

Nicolae Sfetcu

Epistemologia gravitației experimentale Raționalitatea științifică

Colecția ESEURI

MultiMedia Publishing

Nicolae Sfetcu

Epistemologia gravitației experimentale – Raționalitatea științifică

01.08.2019

Sfetcu, Nicolae, "Epistemologia gravitației experimentale – Raționalitatea științifică", SetThings (1 august 2019), MultiMedia Publishing (ed.), ISBN: 978-606-033-234-3, DOI: 10.13140/RG.2.2.14582.75842, URL = <https://www.setthings.com/ro/e-books/epistemologia-gravitatiei-experimentale-rationalitatea-stiintifica/>

Email: nicolae@sfetcu.com



Acest articol este licențiat Creative Commons Attribution-NoDerivatives 4.0 International. Pentru a vedea o copie a acestei licențe, vizitați <http://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>.

Cuprins

INTRODUCERE.....	5
GRAVITAȚIA	6
TESTE GRAVITAȚIONALE	7
METODOLOGIA LUI LAKATOS - RAȚIONALITATEA ȘTIINȚIFICĂ.....	11
EXTINDEREA NATURALĂ A METODOLOGIEI LUI LAKATOS	14
PROGRAME BIFURCATE	16
PROGRAME UNIFICATOARE	17
ABREVIERI	18
<u>1. GRAVITAȚIA NEWTONIANĂ.....</u>	<u>20</u>
1.1 EURISTICILE GRAVITAȚIEI NEWTONIENE	27
1.2 PROLIFERAREA TEORIILOR POST-NEWTONIENE	33
1.3 TESTE ALE TEORIILOR POST-NEWTONIENE	41
1.3.1 TESTE PROPUSE DE NEWTON	41
1.3.2 TESTE ALE TEORIILOR POST-NEWTONIENE	45
1.4 ANOMALII ALE GRAVITAȚIEI NEWTONIENE	45
1.5 PUNCTUL DE SATURAȚIE ÎN GRAVITAȚIA NEWTONIANĂ	47
<u>2. RELATIVITATEA GENERALĂ.....</u>	<u>50</u>
2.1 EURISTICILE PROGRAMULUI RELATIVITĂȚII GENERALE	61
2.2 PROLIFERAREA TEORIILOR POST-EINSTEINIENE	67
2.3 FORMALISMUL PARAMETRIZAT POST-NEWTONIAN (PPN).....	71
2.4 TESTE ALE RELATIVITĂȚII GENERALE ȘI ALE TEORIILOR POST-EINSTEINIENE	75
2.4.1 TESTE PROPUSE DE EINSTEIN	82
2.4.2 TESTE ALE TEORIILOR POST-EINSTEINIENE.....	84
2.4.3 TESTE CLASICE	88
2.4.4 TESTE MODERNE.....	91
2.4.5 TESTE DE CÂMP PUTERNIC.....	100
2.4.6 TESTE COSMOLOGICE	107
2.5 ANOMALII ALE RELATIVITĂȚII GENERALE	120
2.6 PUNCTUL DE SATURAȚIE AL RELATIVITĂȚII GENERALE	121
<u>3. GRAVITAȚIA CUANTICĂ.....</u>	<u>129</u>
3.1 EURISTICILE GRAVITAȚIEI CUANTICE.....	143
3.2 TESTE ALE GRAVITAȚIEI CUANTICE	146
3.3 GRAVITAȚIA CUANTICĂ CANONICĂ	151
3.3.1 TESTE PROPUSE PENTRU GCC	152
3.3.2. GRAVITAȚIA CUANTICĂ ÎN BUCLE.....	154
3.4 TEORIA CORZILOR	159
3.4.1 EURISTICILE TEORIEI CORZILOR	168
3.4.2. ANOMALII ALE TEORIEI CORZILOR.....	172
3.5 ALTE TEORII ALE GRAVITAȚIEI CUANTICE.....	174
3.6 UNIFICAREA (TEORIA FINALĂ).....	176
<u>4. COSMOLOGIA</u>	<u>180</u>

<u>CONCLUZII.....</u>	<u>183</u>
<u>BIBLIOGRAFIE</u>	<u>191</u>

Introducere

În prezenta lucrare abordez evoluția testelor gravitaționale dintr-o perspectivă epistemologică încadrată în conceptul de reconstrucție rațională al lui Imre Lakatos, pe baza metodologiei acestuia a programelor de cercetare. Spre deosebire de alte lucrări pe aceeași temă, perioada evaluată este foarte vastă, începând cu filosofia naturală a lui Newton și până la teoriile gravitației cuantice din zilele noastre. Pentru a explica mai rațional evoluția complexă a conceptului de gravitație din ultimul secol, propun o extindere naturală a metodologiei programelor de cercetare pe care o folosesc apoi pe parcursul lucrării. Consider că această abordare oferă o nouă perspectivă asupra modului în care au evaluat în timp conceptul de gravitație și metodele de testare a fiecărei teorii a gravitației, prin observații și experimente. Argumentez, pe baza metodologiei programelor de cercetare și a studiilor oamenilor de știință și filosofilor, că actualele teorii ale gravitației cuantice sunt degenerative, datorită lipsei dovezilor experimentale pe o perioadă îndelungată de timp și a auto-imunizării împotriva posibilității falsificării. Mai mult, în prezent este în curs de dezvoltare un curent metodologic care atribuie un rol secundar, neimportant, verificărilor prin observații și/sau experimente. Din această cauză, nu va fi posibilă o teorie completă a gravitației cuantice în forma actuală care să includă la limită relativitatea generală, întrucât teoriile fizice au fost dintotdeauna ajustate, în decursul evoluției lor, pe baza testelor observaționale sau experimentale, și verificate prin predicțiile făcute. De asemenea, contrar unei opinii răspândite și a unor programe active actuale privind unificarea tuturor forțelor fundamentale ale fizicii într-o singură teorie finală, pe baza teoriei corzilor, argumentez că este puțin probabil în general să se realizeze această unificare, și nu este posibil oricum ca unificarea să se elaboreze pe baza teoriilor actuale ale gravitației cuantice, inclusiv prin teoria corzilor. În plus, susțin punctele de vedere ale unor oameni de știință și filosofi că în prezent se consumă mult prea multe resurse pe ideea dezvoltării teoriilor gravitației cuantice, și în special teoria corzilor, care să includă relativitatea generală și să unifice gravitația cu celelalte forțe, în condițiile în care știința nu impune astfel de programe de cercetare.

În *Introducere*, după o foarte scurtă istorie a conceptului de gravitație din antichitate până în secolul 17, prezint diverse abordări în timp a metodologiilor din testele gravitaționale, și conceptul de raționalitate științifică a lui Lakatos prin programe de cercetare. Prezint propunerea mea de extindere a metodologiei lui

Lakatos cu doi noi termeni, programe bifurcate și programe unificatoare, cu caracteristicile lor specifice. În *Gravitația newtoniană*, după o analiză a metodologiei folosite de Newton, vorbesc despre euristica negatică (nucleul dur) și euristica pozitivă (strategia de dezvoltare) folosite în elaborarea legii gravitației universale. Urmează o perioadă de proliferare a teoriilor post-newtoniene ale gravitației, testele propuse de Newton și cele pentru celelalte teorii, și apoi evidențierea anomaliilor acumulate de teorie și punctul de saturație, în care se simte nevoia dezvoltării unei alte teorii cu putere euristică mai mare și care să digere anomaliile teoriei lui Newton. Secțiunea *Relativitatea generală* este abordată în același mod, pornind de la o abordare epistemologică și metodologică, euristicile negative și pozitive ale acestui program de cercetare, proliferarea teoriilor post-einsteinien, și descrierea formalismului parametrizat post-newtonian folosit pentru analiza, evaluarea și compararea modelelor de gravitație pe baza testelor de gravitație specifice acestor teorii. Partea finală a secțiunii este dedicată anomaliilor apărute în relativitatea generală și evidențierea punctului de saturație care impune o nouă abordare a gravitației. În *Gravitația cuantică* se abordează aceleași aspecte epistemologice și metodologice, cu accent pe gravitația cuantică canonică (inclusiv gravitația cuantică în bucle) și teoria corzilor, evidențiind problemele metodologice ale acestor teorii și testele care se propun pentru verificarea lor experimentală. Finalizez secțiunea cu evaluarea încercărilor de a obține unificarea tuturor forțelor într-o teorie finală. Urmează o secțiune mai scurtă despre *Cosmologie*, în care analizez programul de cercetare al cosmologiei prin prisma teoriilor gravitației. În *Concluzii* prezint condensat opiniile și argumentele mele dezvoltate pe parcursul întregii lucrări.

Gravitația

Gravitația are un caracter universal, dar puterea sa scade rapid cu distanța, fiind cea mai slabă dintre cele patru forțe fundamentale ale fizicii.¹ În secolul 4 î.e.n., filosoful grec Aristotel considera drept cauză a căderii corpurilor grele tendința de a se deplasa spre locul lor natural.² În Cartea VII din *De Architectura*, inginerul roman și arhitect Vitruvius susține că gravitația nu depinde de "greutatea" unei substanțe, ci mai degrabă

¹ Cele patru forțe "fundamentale" sunt cea electromagnetică, nucleară "slabă" responsabilă de dezintegrarea radioactivă, nucleară "puternică" legând elementele constitutive ale nucleelor, și gravitațională.

² Edward Grant, *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages: Their Religious, Institutional and Intellectual Contexts* (Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1996), 60–61.

de "natura" ei.³ Astronomul și matematicianul indian Brahmagupta a susținut că pământul este sferic și atrage obiectele.⁴ În secolul al XVII-lea, Galileo a descoperit că, contrar învățăturilor lui Aristotel, toate obiectele se accelerau în mod egal când cădeau.⁵ După descrierea gravitației de către Newton ca forță, relativitatea generală consideră că gravitația este o consecință a curburii spațiu-timpului datorită distribuției maselor. Conform teoriei actuale principale, gravitația a apărut odată cu nașterea Universului, în perioada epocii Planck (la 10^{-43} secunde după Big Bang). În prezent, se încearcă dezvoltarea unei teorii cuantice care să unifice gravitația cu celelalte trei forțe fundamentale din natură. Mecanica cuantică cu teoria câmpului cuantic⁶ și relativitatea generală, sunt teoriile fundamentale în cadrul cărora este abordată gravitația.

Teste gravitaționale

Allan Franklin și Slobodan Perovic, în *Experiment in Physics*,⁷ afirmă că teoriile în știință în general, și în fizică în special, sunt confirmate (temporar) prin experimente care verifică afirmațiile și predicțiile teoriilor, punând astfel bazele cunoașterii științifice. Francis Bacon a fost primul care a susținut conceptul de experiment crucial, care poate decide validitatea unei ipoteze sau teorii. Ulterior, Newton a susținut că teoriile științifice sunt induse direct din rezultatele experimentale și observații, excluzând ipotezele netestate. Hobbes a afirmat, dimpotrivă, că rațiunea umană a precedat tehnicile experimentale, criticând optimismul lui Boyle privind rolul metodei experimentale.⁸ În secolul 20, pozitivismul logic separă deducțiile observaționale de cele teoretice. Thomas Kuhn și Paul Feyerabend au criticat această viziune, afirmând că toate experimentele au la bază un cadru teoretic și deci nu pot confirma independent o teorie. Ian Hacking a fost de acord cu această idee, dar afirmă că observațiile rămân

³ Vitruvius Pollio, *De architectura* (Torino: Giulio Einaudi, 1997), 215.

⁴ Muḥammad ibn Aḥmad Bīrūnī, „Alberuni's India”, text, 1910, 272, http://www.columbia.edu/cu/lweb/digital/collections/cul/texts/ldpd_5949073_001/index.html.

⁵ Stillman Drake, *Galileo at Work: His Scientific Biography* (Courier Corporation, 2003).

⁶ Teoria câmpului cuantic este cadrul comun pentru teoria luminii și a electronilor sub formă de câmpuri (electrodinamica cuantică), teoria forțelor nucleare slabe și teoria cuarcilor și gluonilor. Modelul standard al fizicii particulelor reunește aceste abordări și descrie structura internă a atomilor prin câmpuri cuantice.

⁷ Allan Franklin și Slobodan Perovic, „Experiment in Physics”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Winter 2016 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016), <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/physics-experiment/>.

⁸ Steven Shapin și Simon Schaffer, *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life* (Princeton University Press, 1989).

de încredere prin confirmări independente.⁹ În cazul unui singur sistem experimental viabil, Allan Franklin și Slobodan Perovic propun strategii specifice pentru validarea observației, care, împreună cu strategia lui Hacking, constituie o epistemologie a experimentului:

1. Verificarea și calibrarea experimentală, cu ajutorul fenomenelor cunoscute.

2. Reproducerea artefactelor cunoscute în prealabil.

1. Eliminarea surselor plauzibile de eroare și explicațiile alternative ale rezultatului ("strategia Sherlock Holmes").
2. Folosirea rezultatelor pentru a argumenta validitatea lor.
3. Folosirea unei teorii independente bine-coroborată a fenomenelor pentru a explica rezultatele.
4. Folosirea unui aparat bazat pe o teorie bine coroborată.
5. Utilizarea argumentelor statistice.¹⁰

Dar aplicarea acestor strategii nu garantează corectitudinea rezultatelor. Din această cauză, fizicienii folosesc mai multe strategii, în funcție de experiment.

Peter Galison, în *How Experiments End* (1987), afirmă că experimentele se încheie într-un mod subiectiv, atunci când experții cred că au ajuns la un rezultat valid.¹¹ Cele mai multe experimente se bazează pe tradițiile în domeniu și experiența personală a cercetătorului (inclusiv presuposițiile sale teoretice), atât în proiectarea experimentului cât și în acceptarea unei teorii "care permite" desfășurarea experimentelor. Presuposițiile teoretice ale experimentatorilor sunt acceptate.

Harry Collins a dezvoltat un argument numit "regresul experimentatorilor",¹² conform căruia nu există criterii formale pe care să le poți aplica pentru a decide dacă un aparat experimental funcționează corect sau nu. Ce contează în fapt este negocierea în cadrul comunității științifice, care depinde de "factori precum interesele carierei, sociale și cognitive ale oamenilor de știință și utilitatea percepută pentru munca viitoare, dar care nu este decisă prin ceea ce putem numi criterii epistemologice sau judecată raționalizată."¹³

⁹ Ian Hacking, „Do We See Through a Microscope?”, *Pacific Philosophical Quarterly* 62, nr. 4 (1981): 63: 305–322.

¹⁰ Franklin și Perovic, „Experiment in Physics”.

¹¹ Peter Galison, „How Experiments End”, *Journal of Philosophy* 87, nr. 2 (1990): 235.

¹² Harry M. Collins, *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*, Reprint edition (Chicago: University of Chicago Press, 1992), 79–111.

¹³ Franklin și Perovic, „Experiment in Physics”.

Pickering susține, de asemenea, că motivele pentru acceptarea rezultatelor sunt utilitatea ulterioară a lor în practica științifică, și acordul lor cu angajamentele comunitare existente.¹⁴ El afirmă că un sistem experimental produce rareori rezultate experimentale valide dacă nu este ajustat în acest sens, și că teoria aparaturii, cât și teoria fenomenelor, determină producerea unui rezultat experimental valid.¹⁵ Ulterior, concluzionează că "rezultatele depind de modul în care este lumea":¹⁶ "Astfel, felul în care este lumea materială se infiltrează în și infectează reprezentările noastre despre ea într-un mod netrivial și consecvent. Analiza mea arată astfel un angajament intim și reactiv între cunoașterea științifică și lumea materială, care este integrantă practicii științifice".¹⁷

Hacking susține că, în ciuda aparențelor, constructiviștii, precum Collins, Pickering sau Latour, nu cred că faptele nu există sau că nu există realitate. El citează pe Latour și Woolgar că rezultatul este o consecință a muncii științifice mai degrabă decât cauza ei,^{18 19} într-un relativ consens cu comunitatea științifică.

Acumularea unei cantități mari de date în cadrul unui experiment poate impune o selecție, prin tehnica reducerii utilizată de fizicieni, a datelor care vor fi folosite. Aceasta poate fi o preocupare epistemologică importantă privind modul de selecție a datelor considerate utile, minimizând probabilitatea unor rezultate neexplorate.²⁰ În astfel de cazuri, fizicienii aplică o analiză de robustețe în testarea ipotezelor, prin verificarea aparaturii utilizate, și stabilirea unor algoritmi de lucru.

În cazul soluțiilor ecuațiilor lui Einstein din relativitatea generală și a modelării teoriilor gravitației cuantice, datorită complexității acestor abordări se încearcă simulări ale experimentelor pe calculator. În prezent, există o dispută în curs în ce măsură aceste simulări sunt experimente, teorii sau un fel de metode hibride de a face știință.²¹

¹⁴ Andrew Pickering, „The Hunting of the Quark”, *Isis* 72, nr. 2 (1981): 216–36.

¹⁵ Pickering, „The Hunting of the Quark”.

¹⁶ Andrew Pickering, *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*, 1 edition (Chicago: University of Chicago Press, 1995), 182.

¹⁷ Pickering, 183.

¹⁸ Bruno Latour, Steve Woolgar, și Jonas Salk, *Laboratory Life: The Construction of Scientific Facts*, 2nd Edition, 2nd edition (Princeton, N.J: Princeton University Press, 1986), 180.

¹⁹ Ian Hacking, *The Social Construction of What?*, Revised edition (Cambridge, Mass: Harvard University Press, 2000), 80–81.

²⁰ Allan Franklin, *Shifting Standards: Experiments in Particle Physics in the Twentieth Century*, 1 edition (Pittsburgh, Pa: University of Pittsburgh Press, 2013), 224–25.

²¹ Eric Winsberg, *Science in the Age of Computer Simulation* (Chicago: University of Chicago Press, 2010), 136.

În perioada 1965 - 1990 au fost elaborate foarte multe experimente pentru testarea teoriilor gravitaționale, inclusiv²²

- Măsurători de înaltă precizie ale efectelor radiației electromagnetice în câmp gravitațional, confirmând TGR pentru câmpul gravitațional slab.
- Detectarea interacțiunii gravitaționale neliniare a maselor la un pulsar în câmpul gravitațional al unei stele neutronice.
- Confirmarea indirectă a radiației gravitaționale prin observarea a două stele neutronice apropiate, confirmând TGR.
- Încercări, eșuate deocamdată, de a constata încălcarea principiului echivalenței sau existența unei a cincea forțe.

În această perioadă cele mai multe experimente au confirmat relativitatea generală cu ajutorul tehnologiilor nou dezvoltate. S-a creat o bază tehnologică pentru astronomia undelor gravitaționale. S-au construit antene barogene criogenice și antene interferometrice laser performante, asociate cu analiza teoretică a experimentelor cu masele de testare, rezultând că sensibilitatea experimentelor depinde de izolarea termică, dacă dispozitivul înregistrează continuu coordonatele sensibilitatea antenei este limitată, și se poate crește sensibilitatea dacă se folosesc proceduri cuantice.²³ Antenele pot ajuta în observarea radiației gravitaționale de fond și testarea relativității generale în cazul ultra-nelinar.

Referitor la sensibilitatea dispozitivelor de măsurare gravitaționale, Vladimir B Braginsky afirmă că nivelul actual al cunoștințelor ne permite să sperăm că sensibilitatea antenelor poate crește, și nu s-a prevăzut nicio limită a sensibilității în experimentele gravitaționale, ea depinde de priceperea oamenilor de știință.²⁴

În prezent, gravitația experimentală este un domeniu emergent, caracterizat prin eforturi continue de a testa previziunile teoriilor gravitației.

Limita clasică sau limita de corespondență este capacitatea unei teorii fizice de a aproxima versiunea clasică atunci când este luată în considerare prin valorile speciale ale parametrilor săi.²⁵ *Principiul corespondenței* formulat de Niels Bohr în 1920²⁶ afirmă că comportamentul sistemelor descrise de mecanica cuantică reproduce fizica

²² Vladimir B. Braginsky, „Experimental Gravitation (What Is Possible and What Is Interesting to Measure)”, *Classical and Quantum Gravity* 11, nr. 6A (iunie 1994): A1–A7, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/11/6A/001>.

²³ Braginsky.

²⁴ Braginsky.

²⁵ David Bohm, *Quantum Theory*, Revised ed. edition (New York: Dover Publications, 1989).

²⁶ N. Bohr, „Über die Serienspektren der Elemente”, *Zeitschrift für Physik* 2, nr. 5 (1 octombrie 1920): 423–478, <https://doi.org/10.1007/BF01329978>.

clasică în limita numerelor cuantice mari.²⁷ Acest principiu are două cerințe de bază: reproducerea parantezelor Poisson, și specificarea unui set complet de observabile clasice a căror operatori, când acționează prin stări semiclasice corespunzătoare, reproduc aceleași variabile clasice cu mici corecții cuantice.²⁸

Metodologia lui Lakatos - Raționalitatea științifică

Atât relativitatea generală cât și mecanica cuantică sunt *paradigme în sensul lui Kuhn*.²⁹ Ambele coexistă simultan. Dar în schema lui Kuhn nu există o astfel de situație în care două paradigme simultane coexistă în mod pașnic. Paradigma lui Kuhn este definită în primul rând din punct de vedere sociologic.³⁰ În acest sens, "familia" relativiștilor coexistă pașnic simultan cu "familia" teoreticienilor din fizica cuantică, de aproape o sută de ani, fără multă interacțiune între ele. În universități, se predau ambele paradigme. De asemenea, ambele paradigme au o trăsătură comună: pretenția pentru totalitate, universalitate. Teoreticienii cuantici consideră că rolul observatorului și interpretarea statistică corespunzătoare sunt descrise în mod corespunzător doar în cadrul teoriei cuantice. În același timp, susținătorii teoriei (metrice) a relativității generale consideră că interacțiunea gravitațională este universală și trebuie reprezentată prin spațiu-timp curbat, geometric, care influențează la rândul lui gravitația.

Cele două paradigme de mai sus sunt incompatibile în mod esențial, din punctul de vedere al sistemului observațional.³¹ În ciuda incompatibilității, cele două paradigme sunt aplicate în mod tradițional în domenii diferite, și anume macrofizică și microfizică. Ambele paradigme nu prezintă anomalii decisive, și sunt extrem de eficiente și respectate. De asemenea, nu există o concurență între cele două paradigme. Rezultă că *această situație contemporană în fizică nu este compatibilă cu schema lui Kuhn pentru structura revoluțiilor științifice*.

Lakatos a propus o metodologie de investigare a evoluției științei prin programe de cercetare, o combinație între falsificabilitatea lui Popper, revoluțiile științifice ale

²⁷ Paul A. Tipler și Ralph Llewellyn, *Modern Physics*, Sixth edition (New York: W. H. Freeman, 2012), 160–61.

²⁸ Abhay Ashtekar, Luca Bombelli, și Alejandro Corichi, „Semiclassical States for Constrained Systems”, *Physical Review D*, 2005, https://www.academia.edu/587754/Semiclassical_states_for_constrained_systems.

²⁹ Thomas S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, 3rd edition (Chicago, IL: University of Chicago Press, 1996).

³⁰ Kuhn, 10.

³¹ Jürgen Audretsch, „Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions”, *Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 12, nr. 2 (1 septembrie 1981): 322–39, <https://doi.org/10.1007/BF01801202>.

lui Kuhn și toleranța metodologică a lui Feyerabend.³² Conceptului lui Lakatos ia în considerare o serie de teorii incluse într-un program de cercetare, în care fiecare nouă teorie se obține din adăugarea unor clauze auxiliare (sau din reinterprețări semantice) ale teoriilor existente pentru a explica unele anomalii. O astfel de nouă teorie este teoretic progresivă dacă are un conținut empiric în exces față de teoriile existente (dacă prezice un fapt nou), și este progresivă empiric dacă se confirmă unele din aceste predicții (produce fapte noi). O nouă teorie este progresivă atât teoretic cât și empiric, și degenerată în caz contrar. Ea este considerată "științifică" dacă este cel puțin teoretic progresivă. O teorie din serie este "falsificată" când este înlocuită de o teorie cu conținut mai coroborat.

Nu există o limită de timp pentru evaluarea finală a unui program; acestuia nu i se mai aplică nici "refutările" lui Popper, nici "crizele" lui Kuhn. Un nou program de cercetare (un nou concept științific, de exemplu) beneficiază de o anumită toleranță metodologică. Experimentele "cruciale" pot fi considerate ca decisive doar "după o îndelungată retrospectivă": "Descoperirea unei inconsecvențe - sau a unei anomalii - nu trebuie să oprească imediat dezvoltarea unui program: poate fi rațional să se pună inconsistența într-o anumită carantină ad-hoc și să se continue cu euristica pozitivă a programului." Astfel, elipsele lui Kepler au fost admise ca dovezi cruciale pentru Newton și împotriva lui Descartes la o sută de ani după *Principia* lui Newton.³³ Iar Comportamentul anormal al periheliului lui Mercur a fost cunoscut de zeci de ani ca o anomalie în programul lui Newton, dar numai elaborarea teoriei lui Einstein a transformat-o într-o "refutare" a programului de cercetare al lui Newton."

Pentru Lakatos, istoria științei este o istorie a programelor de cercetare concurente ("paradigme"), dar nu include obligatoriu perioadele kuhniene de știință normală, permițând coexistența simultană a teoriilor concurente chiar dacă noua teorie are, pentru o perioadă de timp care poate dura zeci de ani, o putere euristică mai mică.

Euristica este un concept central al filosofiei lui Lakatos. Ea ne spune ce căi de cercetare să evităm (euristica negativă) și ce căi trebuie urmate (euristica pozitivă), oferind o definiție a "cadrului conceptual" (și, în consecință, a limbajului). Euristica negativă ne interzice să îndreptăm *modus tollens* către "nucleul dur" al programului.

³² Imre Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers* (Cambridge University Press, 1980).

³³ Isaac Newton, „*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, I Ed.", The British Library, 1687, <https://www.bl.uk/collection-items/newtons-principia-mathematica>.

Cu ajutorul euristicii pozitive se pot articula sau chiar inventa "ipoteze auxiliare" care formează o centură de protecție în jurul acestui nucleu, care trebuie să suporte testele și să fie ajustate și reglate, sau chiar complet înlocuite, pentru a apăra nucleul.

În timp ce progresul teoretic (în sensul descris de Lakatos) poate fi imediat, progresul empiric este posibil să nu poată fi verificat mult timp, iar într-un program de cercetare pot apare o serie lungă de "refutări", înainte ca ipotezele auxiliare în creștere, cu conținut ingenios adecvat, sau revizuirea unor "fapte" false, să transforme programul într-o poveste de succes. Euristica pozitivă ignoră exemplele reale, datele "disponibile", bazându-se pe "modele" prestabilite de cercetători în cadrul programului de cercetare, care se pot modifica și chiar înlocui în dezvoltarea ulterioară a programului. În această evoluție "refutările" sunt irelevante, fiind previzibile și depășite prin strategia de cercetare.

Conform lui Lakatos, "Această metodologie oferă o reconstrucție rațională a științei. Este cel mai bine prezentată prin contrastul cu falsificarea și convenționalismul."³⁴ Istoria științei este, în opinia lui Lakatos, istoria programelor de cercetare mai degrabă decât a teoriilor, aceasta fiind o justificare parțială a ideii că istoria științei este istoria cadrelor conceptuale sau a limbajului științific. "Un program avansează teoretic dacă noua teorie rezolvă anomalia și este independent verificabilă făcând noi predicții, și avansează empiric dacă se confirmă cel puțin una dintre aceste noi predicții. Un program poate progresa, atât teoretic, cât și empiric, chiar dacă fiecare teorie produsă în cadrul acestuia este respinsă. Un program degenerază dacă teoriile sale succesive nu sunt teoretic progresive (pentru că nu prezic fapte noi) sau nu sunt progresive empiric (deoarece predicțiile noi sunt respinse)."³⁵

Modelele în programele de cercetare sunt seturi de condiții idealizate dar din ce în ce mai apropiate de realitate, și eventual teorii observaționale, folosite în timpul programului pentru a ajuta la dezvoltarea acestuia. Refutările acestor modele sunt prevăzute în cadrul strategiei de dezvoltare (euristica pozitivă), fiind irelevante și "digerate" de următorul model. Astfel, "dificultățile unui program sunt mai degrabă matematice decât empirice." Refutările modelelor sunt mai degrabă verificări (coroborări) ale apropierii modelului de realitate, ale puterii sale euristice. Conform

³⁴ Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 110.

³⁵ Nicolae Sfetcu, „Reconstrucția Rațională a Științei Prin Programe de Cercetare” (2019), <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24667.21288>.

metodologiei, primele modele sunt atât de idealizate încât este posibil să nu corespundă deloc realității.

Conform lui Barry Gholson și Peter Barker, metodologia lui Lakatos sugerează că programele de cercetare evoluează dintr-o stare inițială care seamănă cu instrumentalismul către o stare matură care seamănă cu realismul. În special, în programul de cercetare al lui Newton, Lakatos afirmă că prima teorie dintr-un program poate fi atât de idealizată încât nu reprezintă nimic (semnul distinctiv al instrumentalismului).³⁶ Înlocuirea teoriei cu noi teorii succesive pe măsură ce programul progresează schimbă modelul inițial într-un candidat din ce în ce mai plauzibil pentru realitate. O parte importantă a euristicii programului constă în recomandări pentru încorporarea de noi trăsături, absente în teoria inițială, dar care sunt necesare pentru reprezentările lumii reale. Astfel, caracteristicile instrumentaliste și realiste ale programului de cercetare la Lakatos sunt incompatibile cu categoriile reciproc exclusive prezentate de empiriștii logici.³⁷

Lakatos descrie un program de cercetare după cum urmează:

”Se compune dintr-o serie de teorii în curs de dezvoltare. Mai mult, această serie are o structură. Are un nucleu dur, cum ar fi cele trei legi ale mișcării și legea gravitației în programul de cercetare al lui Newton, și are o euristică, ce include un set de tehnici de rezolvare a problemelor. (...) În cele din urmă, un program de cercetare are o centură vastă de ipoteze auxiliare pe baza căreia stabilim condițiile inițiale. (...) Eu numesc această centură o centură de protecție deoarece protejează miezul dur de refutări: anomaliile nu sunt luate ca refutări ale nucleului dur, ci a unor ipoteze în centura de protecție. (...) centura de protecție este constant modificată, mărită sau complicată, în timp ce miezul dur rămâne intact.”³⁸

Extinderea naturală a metodologiei lui Lakatos

Programele de cercetare permit dezvoltarea unor teorii mai complexe. Barry Gholson și Peter Barker consideră că termenii pot fi aplicați atât la teorii individuale cât și la programe.³⁹ În cazul în care se aplică teoriilor din cadrul unui program de cercetare, consider că acestea devin la rândul lor programe de cercetare, pe care le putem numi *subprograme de cercetare*.

³⁶ Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 50–51.

³⁷ Barry Gholson și Peter Barker, „Kuhn, Lakatos, and Laudan: Applications in the history of physics and psychology”, *American Psychologist* 40, nr. 7 (1985): 755–69, <https://doi.org/10.1037/0003-066X.40.7.755>.

³⁸ Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 179.

³⁹ Gholson și Barker, „Kuhn, Lakatos, and Laudan”.

Spre deosebire de revoluțiile științifice ale lui Kuhn, Lakatos a presupus că existența simultană a mai multor programe de cercetare este norma. Știința se confruntă în prezent cu o astfel de situație inedită: două teorii incompatibile, dar ambele acceptate de comunitatea științifică descriu aceeași realitate în două moduri diferite. Mecanica cuantică guvernează fenomenele la dimensiuni mici ale fizicii particulelor elementare, la viteze mult mai mici decât viteza luminii și energii mari, iar relativitatea generală se ocupă de universul macro, la viteze apropiate de viteza luminii și energii mici. A apărut astfel o problemă a subdeterminării în fizică. Prin gravitația cuantică se încearcă finalizarea revoluției științifice în fizică începută în secolul 19, pentru o unificare a tuturor forțelor fundamentale, prin fuzionarea cele două cadre ale fizicii cuantice și relativității generale. Din eforturile fizicienilor în această tentativă a rezultat o bogată varietate de abordări, tehnici și teorii, dintre care cele mai cunoscute sunt teoria corzilor și gravitația cuantică în bucle. Dar evoluția în această direcție este foarte lentă, și presărată cu multe incertitudini și dispute.

Problema subdeterminării implică faptul că mai mult de o teorie este compatibilă cu datele empirice. Subdeterminarea poate fi relativ la datele disponibile în prezent (subdeterminare tranzitorie, sau științifică), caz în care teoriile ar putea să difere în predicțiile neverificate, sau subdeterminare între teorii sau formulări teoretice cu privire la toate datele posibile (o "subdeterminare permanentă"), când toate predicțiile lor sunt identice. O subdeterminare permanentă dispare (nu are o semnificație reală) în cazul abordării instrumentaliste dacă se individualizează teoriile doar în ceea ce privește conținutul lor empiric.⁴⁰ Dar dacă presupunem că formulările teoriilor alternative descriu scenarii diferite, subdeterminarea trebuie considerată reală.

Quine afirmă că două teorii logic incompatibile pot fi ambele compatibile cu datele⁴¹ dar, dacă există o cartografiere între formulările teoretice, ele nu descriu în fapt teorii diferite, sunt variante diferite ale aceleiași teorii ("reconstrucția predicatelor"). Matsubara afirmă că formulările pot reprezenta două adevărate teorii alternative în ciuda asemănării structurale, întrucât există diferențe semantice relevante care se pierd în cartografierea teoriei formalizată logic sau matematic.⁴²

⁴⁰ Keizo Matsubara, „Realism, Underdetermination and String Theory Dualities”, *Synthese* 190, nr. 3 (2013): 471–489.

⁴¹ Willard V. Quine, „On Empirically Equivalent Systems of the World”, *Erkenntnis* 9, nr. 3 (1975): 313–28.

⁴² Matsubara, „Realism, Underdetermination and String Theory Dualities”.

Programele de cercetare pot rivaliza la un moment dat cu teorii singulare, teoriile singulare între ele, sau programele de cercetare între ele. Putem vorbi astfel de o "unitate de cercetare" ca fiind o teorie singulară sau un program de cercetare.

Programe bifurcate

Barry Gholson și Peter Barker afirmă că metodologia de bază ale lui Lakatos nu este o modalitate eficientă de "a reprezenta metafizica subiacentă identificată de kuhnieni și popperieni"⁴³ datorită existenței simultane a mai multor secvențe de teorii de tipul Lakatos care exemplifică același set de angajamente fundamentale. Conform acestora, programul de cercetare constă dintr-o serie de teorii succesive care formează lanțuri, dar niciodată grupuri sau familii de teorii legate care pot concura.

Este o afirmație eronată. Lakatos nu a negat niciodată astfel de secvențe. Mai mult, se poate dezvolta în mod natural în cadrul metodologiei lui Lakatos o astfel de teorie a grupurilor, numite de aceștia "clustere". Ulterior, Laudan a dezvoltat această idee a unor serii de lanțuri teoretice incluse într-o singură entitate istorică determinată de dominarea unui anumit set de angajamente metafizice.⁴⁴ În unele cazuri pot fi dezvoltate teorii contradictorii pornind din aceleași angajamente de bază.

Metodologia lui Lakatos nu exclude aceste situații, dar ele pot rezulta într-un mod foarte firesc, dacă vom considera că astfel de teorii pornesc de la același nucleu dur (aceeași euristică negativă) dar folosind o strategie de dezvoltare (euristica pozitivă) diferită. Eu numesc aceste teorii ca fiind "**bifurcații**", respectiv **teorii bifurcate** sau chiar **programe bifurcate** în cadrul unei abordări pe o perioadă îndelungată.

Lakatos însuși remarcă faptul că un program de cercetare poate fi bifurcat la un moment dat:

"Dar nu trebuie să uităm că două teorii specifice, în timp ce sunt echivalente matematic (și observațional), ar putea fi încorporate în diferite programe de cercetare rivale, iar puterea euristică pozitivă a acestor programe poate fi diferită.... (un bun exemplu este dovada echivalenței dintre abordarea lui Schrödinger și Heisenberg față de fizica cuantică)." ⁴⁵

⁴³ Gholson și Barker, „Kuhn, Lakatos, and Laudan”.

⁴⁴ L. Laudan, *Progress and its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth* (University of California Press, 1977).

⁴⁵ Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 33–34.

Programe unificatoare

Imediat după 1900, cuantificarea lui Planck a pus sub semnul întrebării întreaga fizică clasică. Până atunci, fizica se dezvoltase prin aplicarea, extinderea, modificarea sau reinterpretarea teoriilor fizice existente stabilite, într-un lanț unidimensional. Dar fizica - în special mecanica newtoniană și electrodinamica maxwell-lorentziană - nu mai erau valabile conform rezultatelor lui Planck. Era necesară o nouă teorie, dar care nu se mai putea obține din extinderea sau modificarea teoriilor fizice existente, deoarece păreau a fi fundamental greșite. Astfel, Einstein a fost nevoit să inventeze o nouă teorie fundamentală, care să încerce să unifice actualele teorii. Așa a apărut relativitatea specială, din necesitate.

Ulterior, unificarea tuturor forțelor, printr-o abordare cuantică a relativității generale, a devenit principala preocupare a gravitației cuantice.⁴⁶ Există precedente în acest sens: din teoria electromagnetică clasică și mecanica clasică au rezultat două noi *teorii unificatoare* separate independente, relativitatea specială și mecanica cuantică; din relativitatea specială și mecanica cuantică a rezultat teoria câmpului cuantic; iar în prezent se speră să se ajungă la o nouă teorie unificatoare, din relativitatea generală (o generalizare a relativității speciale) și teoria câmpului cuantic. Aceste teorii unificate combină teoriile din care s-au format într-un nou cadru comun.

În cadrul metodologiei lui Lakatos, despre aceste teorii unificatoare se poate afirma că aparțin unui nou program de cercetare cu euristici negative și pozitive diferite de cele ale **programelor de cercetare unificate**, dar teoria corespondentă se reduce la teoriile unificate în anumite condiții. Numesc un astfel de program ca fiind un ”**program unificator**” (”**unificator**”) rezultat în cadrul conceptului de unificare.

Pentru a fi acceptat, un program unificator trebuie să aibă o putere euristică (teoretică sau experimentală) mai mare decât programele sale componente.

Astfel, prin teoria corzilor se încearcă unificarea teoriei generale a relativității lui Einstein cu mecanica cuantică, într-o manieră prin care se păstrează conexiunea explicită atât cu teoria cuantică, cât și cu descrierea energetică redusă a spațiu-timpului din relativitatea generală. La energii joase, ea dă naștere în mod natural relativității generale, teoriilor gauge, câmpurilor scalare și fermionilor chirali. Teoria corzilor încorporează mai multe idei care nu au încă dovezi experimentale, dar care ar permite

⁴⁶ Claus Kiefer, „Quantum Gravity — A Short Overview”, în *Quantum Gravity: Mathematical Models and Experimental Bounds*, ed. Bertfried Fauser, Jürgen Tolksdorf, și Eberhard Zeidler (Basel: Birkhäuser Basel, 2007), 2, https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7978-0_1.

teoriei să fie considerată un candidat unificator pentru fizică dincolo de modelul standard.⁴⁷

Matsubara apreciază metodologia lui Lakatos în interpretarea lui Hacking, dar remarcă și el lipsa unei fuziuni a programelor de cercetare diferite în metodologia lui Lakatos, dând ca exemple de teorii unificate mecanica ondulatorie a lui Schrodinger și mecanica matriceală a lui Heisenberg.⁴⁸ El ia în considerare inclusiv posibilitatea unei fuziuni a ideilor din teoria corzilor și a unora dintre concurenții săi, cum ar fi gravitația cuantică în bucle.

Datorită complexității și mării varietăți a fenomenelor la nivel cosmologic, oamenii de știință construiesc modele pe baza unor programe de cercetare individualizate, în funcție de fenomenul specific (fenomene specifice găurilor negre, de exemplu), luând ca nucleu dur al acestor programe principii din relativitatea generală sau mecanica cuantică. Ulterior, aceste programe de cercetare se încearcă să se unifice în cadrul unor programe de cercetare unificatoare, precum găurile negre, sau chiar mai largi, pentru singularități gravitaționale sau spațio-temporale. Pentru fiecare fenomen există mai multe programe de cercetare alternative, în final obținând recunoașterea doar cele care au o putere euristică mai mare, dar de multe ori există grupuri de cercetători mai mici care nu renunță nici la alternativele cu putere euristică mai mică.

Programele de cercetare unificatoare se pot dezvolta simultan cu programele care se vor unifica (și în acest caz putem vorbi de programele unificate ca "**subprograme de cercetare**"), sau ulterior, alegându-se din mai multe programe pe cele care se potrivesc cel mai bine cu programul unificator. Aceasta este o modalitate foarte folosită în ultimii ani. Atunci când un concept evoluează în timp îndelungat prin programe de cercetare independente, fără a exista un program unificator care să le includă, nu mai vorbim de o metodologie a unui anumit program de cercetare, ci de o reconstrucție rațională a științei la care concură aceste programe independente.

Abrevieri

Λ CDM = Modelul cosmologic "Lambda cold dark matter"

CCB = Cosmologia cuantică în bucle

⁴⁷ David Tong, *String Theory* (University of Cambridge, 2009), <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string/string.pdf>.

⁴⁸ Keizo Matsubara, *Stringed Along Or Caught in a Loop?: Philosophical Reflections on Modern Quantum Gravity Research* (Filosofiska Institutionen, Uppsala universitet, 2012).

GC = Gravitația cuantică
GCB = Gravitația cuantică în bucle
GCC = Gravitația cuantică canonică
MC = Mecanica cuantică
MOND Dinamica newtoniană modificată
PEE = Principiul de echivalență Einstein
PPE Principiul puternic de echivalență
PSE = Principiul slab de echivalență
PPN = Formalismul parametrizat post-newtonian
RSO = Realismul structural ontic
TCC = Teoria câmpului cuantic
TGR = Teoria generală a relativității
TSR = Teoria specială a relativității
TC = Teoria corzilor
TF = Teoria finală

1. Gravitația newtoniană

În anumite programe de cercetare, precum teoria mecanicistă a universului conform căreia universul este un ceas uriaș (și un sistem de vârtejuri) cu împingerea ca singura cauză a mișcării, metafizica particulară carteziană a funcționat ca un principiu euristic puternic: a descurajat teorii științifice, precum versiunea "esențialistă" a acțiunii la distanță a lui Newton, care erau incompatibile cu ea (euristica negativă). Și a încurajat ipotezele auxiliare care ar fi putut să o salveze de contradicțiile aparente, cum ar fi elipsele kepleriene (*euristica pozitivă*)."

Prima ediție a *Principia* lui Newton conține doar două comentarii suplimentare despre metodologie: notificarea că scopul lucrării este de a explica "cum să determinăm mișcările adevărate din cauzele lor, efectele și diferențele aparente și, dimpotrivă, cum să determinăm din ipoteze dacă sunt adevărate sau aparente, cauzele și efectele lor";⁴⁹ și, în Scholiul de la sfârșitul Cărții 1, Secțiunea 11, Newton afirmă că abordarea sa distinctivă face posibilă argumentarea mai sigură în filosofia naturală.

În a doua ediție (1713) Newton introduce secțiuni separate pentru fenomene și reguli implicate în determinarea gravitației universale,⁵⁰ iar la sfârșitul Scholiului General din cea de-a treia ediție, 1726, include cea mai faimoasă declarație metodologică:

"Încă nu am putut deduce din fenomene⁵¹ motivul pentru aceste proprietăți ale gravitației și nu născocesc ipoteze. Căci ceea ce nu este dedus din fenomene trebuie să fie numit o ipoteză; și ipotezele, metafizice sau fizice, sau bazate pe calități oculte sau mecanice, nu au ce căuta în filosofia experimentală. În această filosofie experimentală, propozițiile sunt deduse din fenomene și sunt făcute generale prin inducție. Impenetrabilitatea, mobilitatea și impulsul corpurilor, legile mișcării și legea gravitației au fost găsite prin această metodă. Și este de ajuns gravitația să existe într-adevăr și să acționeze în conformitate cu legile pe care le-am expus și ar fi suficiente pentru toate mișcările corpurilor cerești și a mării noastre."⁵²

adăugând ulterior, în alt loc, "cu excepția cazului în care presupunerile sau întrebările au fost propuse a fi examinate prin experimente".⁵³

⁴⁹ Newton, „*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, I Ed.", par. XIV.

⁵⁰ Isaac Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, II Ed., 1713, <https://www.e-rara.ch/zut/338618>.

⁵¹ În filosofia contemporană "deducerea din fenomene" este cunoscută sub denumirea de "inducție eliminativă" și "inducție demonstrativă".

⁵² Isaac Newton, „*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, III Ed.", *Science* 177, nr. 4046 (1726): 943, <https://doi.org/10.1126/science.177.4046.340>.

⁵³ Isaac Newton, *An Account of the Book Entitled Commercium Epistolicum Collinii & Aliorum, de Analysisi Promota*, 1715, 312.

Newton avertizează în *Principia* că folosește teoria matematică într-un mod nou, cu forțele tratate în mod abstract, independent de mecanism, doar din punct de vedere matematic. Clarke și Berkeley în secolul 18 afirmă că aceste pasaje exprimă un agnosticism cauzal strict. Newton scrie că, folosind termeni precum "atracție", nu intenționează să definească o "specie sau mod de acțiune sau o cauză sau motiv fizic."⁵⁴

Referitor la pretenția lui Newton de a "deduce" legea gravitației universale din fenomenele mișcării orbitale, Lakatos a susținut că această afirmație este cel puțin înșelătoare și, în cel mai rău caz, un subterfugiu. Doar un construct ipotetico-deductiv al demonstrației sale a gravitației universale are sens.

Conform lui Andrew Janiak, citirea antimetafizică a tratamentului matematic al forței lui Newton este una rezonabilă. Interpretarea antimetafizică poate fi susținută prin celebra declarație metodologică din *Principia*, "*hypotheses non fingo*", "nu născocesc ipoteze."⁵⁵ Așa cum tratamentul matematic al forței poate fi interpretat ca exprimând agnosticismul cauzal strict, concentrându-se exclusiv pe descrieri empirice ale mișcărilor din sistemul solar, metodologia lui Newton poate fi interpretată ca exprimând un agnosticism metafizic mai general."⁵⁶

Pentru Newton, știința, "filosofia experimentală", presupune propoziții explicative care pot fi "deduse din fenomene". Ceea ce nu poate fi dedus în acest fel este doar o ipoteză. Dar Newton nu evită ipotezele, doar că nu le încadrează în știință, considerându-le pur speculative. Locul lor este rezervat în Interogările din *Optica*,⁵⁷ și în adnotații explicite în *Principia*. Ipotezele sunt elaborate de Newton atunci când nu dispune de un suport empiric independent pentru acele afirmații. În Scholiul General, el afirmă: "Căci ceea ce nu este dedus din fenomen trebuie să fie numit o ipoteză; și ipotezele, fie metafizice sau fizice, fie bazate pe calități oculte, fie mecanice, nu au ce căuta în filosofia experimentală."⁵⁸

Din punctul de vedere al lui Newton, gravitația nu este mecanicistă; dar el admite și faptul că nu știe "motivul" proprietăților gravitației exprimate în legea

⁵⁴ Andrew Janiak, *Newton as Philosopher* (Cambridge University Press, 2010), 16.

⁵⁵ Lakatos afirmă că cea mai bună reconstrucție rațională a faimoasei expresii "*hypotheses non fingo*" a lui Newton este probabil; "Eu resping degenerarea comutărilor de probleme care sunt concepute pentru a păstra unele teorii care sunt sintactic metafizice, cf. Imre Lakatos, „Criticism and the Methodology of Scientific Research Programmes”, *Proceedings of the Aristotelian Society* 69, nr. 1 (1968): 180.

⁵⁶ Janiak, *Newton as Philosopher*, 17.

⁵⁷ Isaac Newton, *Opticks : Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light* (London : Printed for William Innys at the West-End of St. Paul's, 1730), <http://archive.org/details/opticksortreatis1730newt>.

⁵⁸ Newton, „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, III Ed.", 943.

gravitației universale, și anume că nu deține o explicație fizică a acestei forțe, refuzând să facă preupuneri pe această temă. Spre deosebire de Leibnitz, el afirmă în mod explicit că o anumită cauzalitate în natură este non-mecanică, contestând astfel filosofia mecanicistă predominantă în acea perioadă. În acest sens, Stein și DiSalle afirmă că Newton a fost un empirist radical în dezbaterile metafizice: el nu doar respinge filosofia mecanicistă a lui Descartes, Leibniz și Huygens, dar transformă întrebările metafizice considerate de aceștia ca pur *a priori* în chestiuni empirice, a căror răspunsuri depind de dezvoltarea fizicii.⁵⁹

Newton este dispus să susțină poziții metafizice, precum în cazul structurii spațiului și timpului sau cauzalitate, dar respinge abordările carteziene *a priori*, punând fizica înaintea metafizicii, ceea ce face din el, conform lui Stein și DiSalle, nu un antimetafizician, ci un metafizician empiricist, cu o atitudine empirică principială față de întrebările metafizice.

Pentru a înțelege mișcarea într-un mod în concordanță cu legile sale, Newton postulează spațiul absolut,⁶⁰ permițându-i astfel să conceapă mișcarea ca o schimbare în spațiul absolut. Această idee permite lui Newton să salveze efectele perceptibile de accelerare ale corpurilor ca mișcări reale în spațiul absolut.⁶¹

Filosofia naturală a lui Newton poate fi înțeleasă doar dacă luăm în considerare concepția lui despre Dumnezeu:

”Newton a invocat pe Dumnezeu în acțiunea la distanță dintr-un motiv specific, pentru a susține gravitația în univers, avertizând împotriva unei viziuni a universului ca o simplă mașină... a încercat astfel să dezvolte un concept despre Dumnezeu care să ofere un model stabil, organizat și predictibil al lumii naturale, un Dumnezeu care proiectează pe principii raționale și universale, accesibile tuturor oamenilor... el apelează la Dumnezeu pentru a explica mecanismele pe care nu le poate explica altfel, inclusiv acțiunea la distanță.”⁶²

Teoria gravitației lui Newton a fost respinsă în mod fundamental de contemporanii lui pentru încălcarea normelor filosofiei mecaniciste. Conform lui Andrew Janiak, Newton a fost forțat să-și apere tratamentul matematic al forței și mișcării pe baze metafizice fundamentale.⁶³ După revoluția în fizică din secolul 17 de

⁵⁹ Janiak, *Newton as Philosopher*.

⁶⁰ În Scholium, declară explicit că spațiul absolut nu este perceptibil (Newton, „*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, I Ed.”, 414.) fiind conștient că mișcarea adevărată este dificil de detectat dacă este mișcare absolută.

⁶¹ Newton, „*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, III Ed.”, 423.

⁶² Nicolae Sfetcu, *Isaac Newton despre acțiunea la distanță în gravitație - Cu sau fără Dumnezeu?* (MultiMedia Publishing, 2018), <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24577.97122>.

⁶³ Janiak, *Newton as Philosopher*.

trecere de la filosofia neo-aristoteliană ("scolastică") la cartesianism, Newton a provocat o nouă schimbare de paradigmă prin înlocuirea filosofiei mecaniciste cu filosofia naturală. Această cea de a doua schismă s-a produs în lipsa unei continuități conceptuale. Deși fără un sistem metafizic propriu, Newton s-a apărat articulând o relație convingătoare între fizica matematică și metafizică în disputele privind spațiul și timpul, materia, legile mișcării, natura forțelor și relația lui Dumnezeu cu lumea.

Principia a declanșat o discuție amplă printre contemporanii lui Newton despre metodologia care trebuie adoptată atunci când se studiază lumea naturală.

Pentru Newton, forța a fost principalul concept care explică mișcarea și cauzele ei în natură. El a conceput forțele ca niște acțiuni efemere, ca niște *cantități*, prin legătura dintre masă și accelerație oferind un mijloc de măsurare a forțelor. În Cartea a III-a a *Principiei*, Newton identifică forța centripetală care menține orbitele planetare cu forța gravitației, cea care provoacă căderea liberă a obiectelor pe pământ. De aici a tras concluzia, în Cartea a III-a, că toate corpurile sunt atrase între ele proporțional cu cantitatea lor de materie (gravitația universală). El recunoaște totuși că nu cunoaște cauza gravitației: "încă nu am putut deduce din fenomene motivul aceste proprietăți ale gravitației și nu născocesc ipoteze."⁶⁴

Prin cea de-a șaptea propoziție a Cărții a III-a a *Principiilor*, Newton a ajuns la următoarea concluzie: "Gravitația acționează universal asupra tuturor corpurilor și este proporțională cu cantitatea de materie din fiecare."⁶⁵

Metodologia *Principiei* de descoperire a forțelor prezente în natură era controversată, inclusiv pentru acțiunea la distanță. În a doua ediție din 1713, a adăugat alte observații metodologice, numite de el "*regulae philosophandi*", sau regulile filosofiei. Primele două reguli se referă la raționamentul cauzal, iar cea de-a treia regulă, foarte mult dezbătută de contemporani, făcea referire la o problemă de inducție: avem percepții și experimente pentru cunoaștere, dar pe ce bază putem generaliza? Newton dă un răspuns parțial în propunerea șapte din Cartea a III-a a *Principiei*, în regula 3:

"Aceste calități ale corpurilor care nu pot fi intenționate și remise [adică crescute și diminuate] și care aparțin tuturor corpurilor pe care pot fi făcute experimente, ar trebui luate drept calități ale tuturor corpurilor universale."⁶⁶

⁶⁴ Alexandre Koyre, *From the Closed World to the Infinite Universe* (Johns Hopkins University Press, 1957), 229.

⁶⁵ Newton, „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, III Ed.", 810.

⁶⁶ Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, II Ed.

Newton leagă această a treia regulă de legile sale de mișcare:

”Faptul că toate corpurile sunt mobile și perseverează în mișcare sau în repaus prin anumite forțe (pe care le numim forțe de inerție), deducem din găsirea acestor proprietăți în corpurile pe care le-am văzut. Extensia, duritatea, impenetrabilitatea, mobilitatea și forța inerției [Aceasta este o modalitate potențial confuză de a se referi la masa specifică, ceea ce am numi masa inerțială a unui corp. A se vedea definiția a treia în *Principia* ⁶⁷.] a întregului apar din prelungirea, duritatea, impenetrabilitatea, mobilitatea și forța inerției fiecărei părți; și astfel ajungem la concluzia că fiecare dintre cele mai puține părți ale tuturor corpurilor este extinsă, tare, impenetrabilă, mobilă și dotată cu o forță de inerție. Și aceasta este fundamentul întregii filosofii naturale.”⁶⁸

Leibniz a afirmat că spațiul euclidian tridimensional al lui Newton permite ”stări distincte, dar *de nedistins* dacă se schimbă pur și simplu pozițiile absolute ale tuturor corpurilor materiale, păstrând în același timp pozițiile lor relative.”⁶⁹ În toate cadrele inerțiale sunt valabile aceleași legi ale mișcării, deci ar fi imposibil, aplicând legile lui Newton, să determinăm care este cadrul inerțial. Leibniz conchide că ar trebui să folosim principiul parsimoniei pentru a respinge astfel de entități ”metafizice”.

Dar mecanica newtoniană nu satisface principiul de relativitate pentru accelerație absolută și rotație absolută, numai pentru cadre inerțiale. În sistemele accelerate sau rotite, legile newtoniene nu mai sunt valabile. Ar rezulta că accelerația și rotația absolute au semnificație fizică, rezultând o dilemă. Practic teoria combinată a spațiului și timpului newtonian și electrodinamica lui Maxwell se dovedește a fi falsă.⁷⁰ Einstein a rezolvat acest paradox în 1905, menținând legile lui Maxwell intacte dar schimbând transformările care leagă cadrele inerțiale.

Newton a introdus termenul ”filosofie experimentală” în 1712, într-un pasaj la Scholiul General al *Principiilor* unde și-a expus metodologia împotriva ipotezelor. Scopul său a fost de a-și apăra astfel teoria gravitației împotriva criticilor, în special ale lui Leibniz:

”Filosofia experimentală reduce fenomenele la regulile generale și privește regulile ca fiind generale atunci când acestea sunt valabile în general pentru fenomene.... Filosofia ipotetică constă în explicații imaginare ale lucrurilor și argumente imaginare pentru sau împotriva unor astfel de explicații sau împotriva argumentelor. Filosofia experimentală

⁶⁷ Newton, „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, III Ed.”, 404–5.

⁶⁸ Newton, 95–96.

⁶⁹ Michael Friedman, *Foundations of Space-Time Theories: Relativistic Physics and Philosophy of Science* (Princeton University Press, 1983).

⁷⁰ Friedman.

este fondată pe inducție. Primul fel de filosofie este urmat de mine, cel din urmă prea mult de Descartes, Leibnitz și alții.”⁷¹

Termenul desemnează mai degrabă știința empirică. El a fost adăugat și la a doua ediție a *Principiei* în 1713, unde a afirmat că a demonstrat existența gravitației chiar dacă nu a găsit cauza acesteia, enumerând diferitele proprietăți ale gravitației. Newton își expune metodologia și în Întrebarea 31 din *Optica*, unde este preocupat de forță și filosofia naturală. Filosofia experimentală a lui Newton este considerată ca având două elemente esențiale: excluderea ipotezelor din filosofia naturală; și cerința ca propozițiile în filosofia experimentală să fie "deduse din fenomene și făcute generale prin inducție". Newton respinge astfel ipotezele fără sprijin experimental. Cele cu suport experimental, dar insuficient pentru a ajuta la demonstrarea principiilor științifice, sunt permise dar distincte de principiile stabilite, ca întrebările din *Optica*. Acest tip de ipoteză poate sugera noi experimente și ajuta la explicarea proprietăților și principiilor deja descoperite.

În a doua ediție engleză a *Principiei* din 1717 Newton a detaliat termenul "filosofie experimentală" și a introdus metoda de inducție:

"Această analiză constă în efectuarea de experimente și observații, și în a trage concluzii generale de la ele prin inducție și în a nu accepta obiecții împotriva concluziilor, dar care sunt luate din experimente sau din alte anumite adevăruri. Pentru că ipotezele nu trebuie născocite în filosofia experimentală. Și, deși argumentarea din experimente și observații prin inducție nu este o demonstrație a concluziilor generale; totuși este cel mai bun mod de a argumenta ceea ce recunoaște Natura Lucrurilor și poate fi considerată cu atât mai puternică, cu cât Inducția este mai generală. Și dacă nu apare nicio excepție de la Phaenomena, Concluzia poate fi pronunțată în general. Dar, în orice moment după aceea, orice Excepție va apărea din Experimente, atunci poate începe să fie pronunțată cu astfel de Excepții așa cum apar.”⁷²

Astfel, existența gravitației "a fost dovedită de demonstrații matematice bazate pe experimente și fenomenele naturii: și domnul Leibnitz nu poate nega faptul că acestea au fost dovedite."

Confirmarea se face, după Newton, în primul rând prin demonstrație matematică și în al doilea rând prin experiment. El a fost convins că o abordare matematică deductivă duce la certitudine și experimentul poate oferi anumite fundamente necesare unei științe, dar până în secolul 18 el nu a atribuit experimentului locul de frunte în metodologia sa.

⁷¹ Newton, „Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, I Ed.”

⁷² Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, II Ed.*, 404.

Conform lui Laudan,⁷³ Newton a considerat că unul din scopurile centrale ale filosofiei naturale este de a arăta mâna Creatorului în detaliile creației sale: "pentru că a vorbi despre Dumnezeu din aparențele lucrurilor, este cu siguranță o filosofie naturală."⁷⁴ Teoriile, conform lui Newton, pot fi certe sau foarte probabile. Între două teorii rivale, probabil că Newton ar fi ales ceea ce ar fi promovat scopurile sale cognitive, precum în cazul filosofiei mecaniciste. Dar trebuie ținut cont de faptul că unele scopuri cognitive ale lui Newton diferă de cele actuale. Prin urmare, conform lui Laudan putem evalua raționalitatea lor prin a determina dacă acțiunile lor au promovat unele scopuri, iar acțiunile lor pot fi determinate ca fiind raționale doar cu referire la produsul corespunzător ponderat al utilităților lor cognitive.

Conform lui Robert Disalle, Newton oferă argumente inductive pentru o concluzie metafizică, în timp ce Einstein utilizează analize epistemologice pentru a descompune noțiunile metafizice. Dar argumentele lui Newton au aceeași formă și scop de bază ca cele ale lui Einstein. Experimentele de gândire ale lui Newton referitoare la găleata de apă sunt, practic, argumente pentru un mod de a conecta procesele fizice cu structurile spațiului și timpului.⁷⁵

Până în cel puțin a doua jumătate a secolului, sistemele lui Locke și Newton au fost percepute ca fiind bazate pe principii și metode foarte asemănătoare, compuse din filosofie naturală și morală. Locke și Newton împărtășesc o concepție similară a metodei științifice, bazată pe experimente și observații raționale și regulate și pe utilizarea generalizării și a deducerii. Astfel G. A. Rogers scrie:

"Ceea ce a găsit Locke în *Principia* a fost exemplificarea unei metode la care el a subscris deja. El credea deja că o combinație de observare, generalizare sau inducție și deducere este singura cale spre cunoașterea naturii, și că *Principia* a expus exact această metodă în modul său cel mai fructuos. . . . A confirmat pentru el toate concluziile metodologice proprii. . . . Principiul era pentru Locke îndreptățirea unei abordări metodologice generale la care se abonase probabil de douăzeci de ani."⁷⁶

⁷³ Laudan, *Progress and its Problems*.

⁷⁴ Newton, „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, III Ed.”

⁷⁵ Robert Disalle, „Spacetime Theory as Physical Geometry”, *Erkenntnis* 42, nr. 3 (1995): 317–337.

⁷⁶ G. A. J. Rogers, „Locke’s Essay and Newton’s Principia”, *Journal of the History of Ideas* 39, nr. 2 (1978): 217–32, 229.

Hume își asociază și el în mod explicit lucrarea cu metoda lui cu Newton, deși există o distincție clară între inductivismul lui Hume și concepția lui Locke despre metodologia științei naturale.⁷⁷

1.1 Euristicile gravitației newtoniene

Exemplul clasic al unui program de cercetare de succes este teoria gravitațională a lui Newton, probabil cel mai de succes program de cercetare lakatosian. Inițial, teoria gravitațională a lui Newton s-a confruntat cu o mulțime de "anomalii" ("contraexemple"), și a contrazis teoriile observaționale care susțineau aceste anomalii. Dar suporterii programului de cercetare a gravitației newtoniene au transformat fiecare anomalie în cazuri coroborante. Mai mult, au evidențiat ei înșiși contraexemple pe care le-au explicat apoi prin teoria newtoniană.⁷⁸ Conform lui Lakatos, "în programul lui Newton euristica negativă ne invită să redirecționăm *modus tollens* de la cele trei legi ale dinamicii lui Newton și legea lui de gravitație. Acest "nucleu" este "irefutabil" prin decizia metodologică a proponentilor săi: anomaliile trebuie să conducă la modificări numai în centura "protectoare" a ipotezelor auxiliare, "observaționale" și a condițiilor inițiale."⁷⁹

Newton a stabilit euristica pozitivă a programului său de cercetare printr-o strategie de aproximări succesive.⁸⁰ Primele trei legi de mișcare ale lui Newton au reglementat raționamentul inductiv, împreună cu viziunea lui Newton privind o taxonomie fundamentală bazată pe forțe fizice (interacțiuni). A pornit de la un sistem solar idealizat, cu un Soare punctual și o singură planetă învârtindu-se în cerc în jurul Soarelui. Apoi a considerat că orbita planetei este o elipsă, derivând proporționalitatea dintre forța gravitațională și inversul pătratului distanței dintre planetă și Soare.

Generalizarea inductivă a lui Newton a considerat o mișcare elementară cu o forță statică inclusă în legea dedusă a gravitației, și ideea că mișcările planetare pot fi generalizate. Acestea au fost ipotezele sale de lucru pe baza cărora a procedat la generalizările sale inductive. Ele oferă o protecție imediată a nucleului dur al programului de cercetare newtonian (euristica negativă), prin solicitarea ca dovezile

⁷⁷ Graciela de Pieris, „Hume and Locke on Scientific Methodology: The Newtonian Legacy”, *Hume Studies* 32, nr. 2 (2006): 277–329.

⁷⁸ Pierre-Simon Marquis De Laplace, *Exposition du système du monde*, 2-lea ed (Cambridge; 2009: Cambridge University Press, 2009).

⁷⁹ Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 48.

⁸⁰ Lakatos, „Criticism and the Methodology of Scientific Research Programmes”.

dezvoltate din date să fie de înaltă calitate.⁸¹ Deducția legii gravitației a îndeplinit această cerință într-o măsură mai mare decât raționamentul său demonstrativ, dar "deducția" s-a bazat în primul rând pe mișcarea a numai cinci planete într-o perioadă astronomică scurtă de timp.

Newton recunoaște riscul introducerii unor astfel de ipoteze de lucru taxonomice în generalizarea inductivă, în cel mai faimos pasaj metodologic din *Optica*, în discuția despre metodele de "analiză și sinteză" din următorul paragraf al întrebării finale, care a fost adăugat în 1706. El a considerat că succesul obținut din generalizări nerestricționate este cea mai bună protecție împotriva riscului introdus de ipotezele taxonomice inevitabile care intră în inducție.⁸²

Acest model contrazicea legea acțiunii și reacțiunii pe care Newton a inclus-o în nucleul dur, astfel încât a dezvoltat un model mai complex, în care soarele și planeta se roteau în jurul centrului lor de greutate comun. Nu genera nicio anomalie, dar era dificil de dedus din el legile reale de mișcare pentru mai multe corpuri. Astfel încât Newton a elaborat o nouă teorie, pentru mai multe planete, cu interacțiuni între fiecare planetă și Soare dar neglijând interacțiunile dintre planete.

După verificarea intermediară a cestei teorii, Newton a dezvoltat o teorie mai complexă, considerând că Soarele și planetele nu sunt punctuale, ci sfere cu dimensiuni diferite de zero, întrucât trebuia, în teoria sa, să țină cont de densitatea corpurilor, și nu se putea accepta ca un corp punctual să aibă densitate infinită. A luat apoi în considerare și mișcarea de rotație a corpurilor în jurul axelor proprii. În următorul model a ținut cont de forma ne-sferică a Pământului și variația gravitației suprafeței cu latitudinea, orbita Lunii, maréele, precesiunea echinocțiilor și traiectoriile cometelor. Prin această euristică pozitivă a încercat să se protejeze împotriva riscurilor care apar în saltul inductiv, împingând imediat teoria spre analiza tuturor fenomenelor relevante, și folosind-o ca instrument de cercetare pentru problemele întâmpinate.⁸³ În același timp, deducțiile în cazul Pământului i-au permis generalizarea de la gravitația celestă la gravitatea universală, ca și precesiunea echinocțiilor în mod indirect, ținând cont de forțele (interacțiunile) dintre planete, calculând perturbațiile rezultate. Mareea și precesiunea echinocțiilor au permis generalizarea de la forțe simple centripetale la o gravitație interactivă, la fel ca și studiul orbitelor lui Jupiter și

⁸¹ I. Bernard Cohen și George E. Smith, *The Cambridge Companion to Newton* (Cambridge University Press, 2006).

⁸² Cohen și Smith.

⁸³ Cohen și Smith.

Saturn. Iar studiul cometelor a permis extinderea legii gravitației la corpuri posibil dintr-o materie foarte diferită.

A publicat rezultatele programului său de cercetare doar atunci când a considerat că a obținut maximum posibil din observații și matematică. Procesul de comparare cu fenomenele și argumentele pentru universalitatea gravitației se întind pe tot cuprinsul Cărții 3.

Generalizarea inductivă a lui Newton pentru gravitația universală a introdus un element conjectural important falsifiabil, care a fost verificat ulterior, furnizând cele mai convingătoare dovezi în favoarea sa. Ideea de bază a fost că orice discrepanță dintre teoria Newtoniană și observație se va dovedi a fi semnificativă din punct de vedere fizic și ne va spune ceva mai mult despre lumea fizică. Prin aceasta, ipotezele de lucru taxonomice care stau la baza pasului inductiv al lui Newton față de gravitația universală rămân intacte, pe măsură ce teoria avansează.

Pe baza ipotezelor suplimentare contestabile, și a sugestiilor cu privire la mișcările lui Jupiter și Saturn, Newton și-a inițiat propria secvență de aproximări succesive după *Principia*. Chiar și după ce a apărut cea de-a treia ediție a *Principia*, la aproape patruzeci de ani, încă se mai studiau fiecare dintre aceste subiecte din *Principia*. Argumentul lui Newton pentru gravitația universală a fost finalizat abia la un secol după publicarea primei ediții a *Principiilor*.

Newton a prevăzut de la început dezvoltările ulterioare ale modelelor sale pornind de la primul model complet idealizat. A înțeles că modelele intermediare vor conține anomalii, dar trebuia să treacă prin ele pentru a putea dezvolta aparatul matematic prin confuntarea cu modelele și modificând teoria pe parcurs astfel încât să elimine anomaliile.

Newton a afirmat că prin *Principia* a ilustrat o nouă abordare a anchetei empirice. Dar, în afară de remarca despre derivarea forțelor din fenomenele mișcării și apoi a mișcărilor din aceste forțe în Prefața la prima ediție, și remarca despre compararea unei teorii matematice generice a forțelor centripetale cu fenomenele pentru a afla condițiile de acțiune a forței, de la sfârșitul Cărții 1, Secțiunea 11, singura remarcă notabilă despre metodologie este faimosul pasaj din Scholium-ul general adăugat în cea de-a doua ediție ca o declarație finală.⁸⁴ (S11)

⁸⁴ George Smith, „Newton’s Philosophiae Naturalis Principia Mathematica”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Winter 2008 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2008), <https://plato.stanford.edu/archives/win2008/entries/newton-principia/>.

Succesul fără precedent al teoriei gravitației lui Newton a stimulat interesul în metodologia *Principiei* pentru a o folosi și în alte domenii. Două aspecte ale metodologiei sunt evidente pentru George Smith:⁸⁵ Newton a contrapus metoda sa celei a ipotezelor "născocite", și cerința ca întrebările să fie considerate deschise atâta timp când considerentele empirice nu le-au dat încă răspunsuri (o cerință în perfectă concordanță cu toleranța metodologică propusă de Lakatos în programele de cercetare). Scopul metodei a fost de a limita pretențiile teoretice la "generalizările inductive".

Fiecare model succesiv din programul lui Newton prezice un nou fapt, este o creștere a conținutului empiric: constituie o *schimbare teoretică progresivă consistentă*. Și fiecare predicție este verificată în cele din urmă, deși anterior ar fi putut fi instantaneu "refutată".

Ideea centrală a metodei inductive newtoniene este că legile universale derivă inductiv din "calități manifeste" sau "fenomene" observate, și numai fenomenele observate ne pot duce la revizuirea acestor legi. Newton se opune în mod explicit explicațiilor pur ipotetice ale filosofiei mecaniciste. Leibniz și Huygens, au acceptat demonstrația lui Newton că orbitele sateliților marilor corpuri astronomice din sistemul solar respectă legea inverso-pătrată, dar au respins legea lui Newton de gravitație universală pentru că erau legați de filosofia mecanicistă. Regulile lui Newton III și IV au fost adăugate la edițiile a doua (1713) și a treia (1726) ale *Principiei* ca răspuns la obiecțiile filosofilor mecaniciști:

Regula III: "Acele calități ale corpurilor care nu pot fi intenționate și remise [adică, nu pot fi mărite și diminuate] și care aparțin tuturor corpurilor pe care pot fi făcute experimente, ar trebui să fie considerate calități ale tuturor corpurilor universale."⁸⁶

Regula IV: "În filosofia experimentală, propozițiile adunate din fenomene prin inducție trebuie considerate fie exacte, fie foarte aproape adevărate, în ciuda oricăror ipoteze contrare, până când alte fenomene nu fac astfel de propoziții fie mai exacte, fie supuse unor excepții."⁸⁷

Aceste reguli precizează că metoda universalizării inductive trebuie aplicată fără interferența ipotezelor. Newton afirmă explicit că ipotezele filosofiei mecaniciste obstrucționează metoda sa. El ilustrează aici folosirea metodei sale prin descrierea mai întâi a inferenței inductive a legii universale că toate corpurile sunt extinse.

⁸⁵ Smith.

⁸⁶ Newton, „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed.”, 795.

⁸⁷ Newton, 796.

Bernard Cohen descrie astfel euristica pozitivă a lui Newton, în Capitolul 5 din *The Cambridge Companion to Newton* ca "stilul newtonian" etapizat:⁸⁸ (1) problema unui "singur corp", (2) problemele "cu două corpuri", (3) problemele a trei sau mai multe corpuri care interacționează. Astfel, Newton trebuie să abordeze complexitatea unei mișcări orbitale reale într-o succesiune de aproximări succesive, fiecare aproximație fiind o mișcare idealizată, și cu abateri sistematice, oferind dovezi pentru următoarea etapă a secvenței.

În modelele sale idealizate, Newton a impus două restricții aproximărilor succesive.⁸⁹ În fiecare caz în care deduce unele caracteristici din forțele gravitaționale cerești, a argumentat că consecința deducției "dacă-atunci" încă mai păstrează proximitatea atâta timp cât antecedentul deține proximitatea. Iar rezultatele matematice stabilite din Cartea 1 îi permit să identifice condițiile specifice în care fenomenul din care se face deducerea ar avea nu doar proximitate, ci și exactitudine. Rezultă că "deducțiile" lui Newton din fenomene implică încercarea de a aborda complexitatea mișcărilor din lumea reală într-o succesiune de idealizări progresive din ce în ce mai complexe, cu deviații sistematice față de idealizări, fiecare model servind ca bază pentru următorul model mai complex. Abaterile sistematice sunt numite "fenomene de ordin secundar" atunci când nu sunt observabile în sine, ci deduse teoretic.⁹⁰ Aceasta respectă *prima regulă a lui Newton pentru filosofia naturală* - că nu ar trebui admise mai multe cauze decât atât cele adevărate și suficiente pentru a explica un fenomen.

Legea gravitației lui Newton oferă o explicație a regulilor lui Kepler și a mișcărilor orbitale idealizate pentru fiecare model idealizat anterior, deci are o putere euristică mai mare decât oricare model anterior. Prin această lege se poate explica de ce aceste idealizări sunt valabile cel puțin în proximitate.

Din perspectiva lui Lakatos, în secolul 17 se aflau în competiție trei sisteme științifice: programul de cercetare al lui Aristotel, cel al lui Descartes, și programul lui Newton apărut ca un rival al programului lui Descartes. Atât programul lui Descartes cât și al lui Newton au fost progresive față de cel al lui Aristotel, putând explica mișcările cometelor și a mareelor. Cartezienii puteau explica de ce luna păstra întotdeauna aceeași față spre pământ și de ce toate planetele se rotesc în aceeași

⁸⁸ Cohen și Smith, *The Cambridge Companion to Newton*.

⁸⁹ Domenico Meli, „The Relativization of Centrifugal Force”, *Isis: A Journal of the History of Science* 81 (1990): 33.

⁹⁰ Cohen și Smith, *The Cambridge Companion to Newton*.

direcție, în timp ce newtonienii puteau explica modul în care planetele se influențează reciproc.⁹¹ Diferențe explicative au rezultat din nuclee dure diferite. Nucleul programului cartezian a specificat acțiunea prin contact și a interzis în mod explicit conceptul de acțiune la distanță.

Programul lui Newton include și elemente din programul cartezian mai vechi, precum acțiunea prin contact. Acesta este un exemplu al unui schimb fructuos între programe. Dar dovezile empirice au condus în cele din urmă la eșuarea programului cartezian.

Programul lui Lorentz a atins o poziție dominantă la începutul secolului 20, fiind apoi depășit de cel al lui Einstein, atât teoretic cât și empiric, aproape imediat după inițierea sa în 1905.⁹² Deși programul lui Lorentz a fost de asemenea progresiv, programul relativității a învins, fiind în mod consecvent mai progresiv și asimilând transformările Lorentz.⁹³

În succesul programului lui Einstein au fost implicate mai multe programe de cercetare: programul newtonian, provocat de un program susținut de Lorentz⁹⁴ care a făcut ca electromagnetismul să fie acceptat ca mai fundamental decât mecanica; un al doilea program rival susținut de Ostwald și Mach prin care s-a încercat să se dezvolte o fizică pur fenomenologică, cu energia ca un concept de bază,⁹⁵ programul lui Einstein care a implicat teoriile de relativitate; și programul de fizică cuantică inițiat de Bohr și dezvoltat prin teoriile lui Heisenberg, Schrodinger și Dirac.

În primele două decade ale secolului 20, fizica cuantică a învins programul fenomenologic și a înlocuit fizica newtoniană, dar matematica și ontologia noului program erau incompatibile cu matematica și ontologia programului lui Einstein. Totuși, aceste programe coexistă și în prezent. Rivalitatea între aceste programe a stagnat în anii 1940 și 1950, reînviind odată cu apariția radioastronomiei, care a permis un nou progres empiric.

Metodologia lui Lakatos oferă un cadru conceptual puternic, care, ca și în cazul lui Kuhn, derivă din analiza episoadelor istorice din fizică. Dar, spre deosebire de Kuhn, Lakatos a prezentat o metodologie care evită problemele de

⁹¹ E. J. Aiton, *Vortex Theory of Planetary Motions*, First Edition edition (London; New York: American Elsevier Publishing Co., Inc., 1972).

⁹² Elie Zahar, „Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's? (II)”, *British Journal for the Philosophy of Science* 24, nr. 3 (1973): 211–75.

⁹³ Gholson și Barker, „Kuhn, Lakatos, and Laudan”.

⁹⁴ Zahar, „Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's?”

⁹⁵ Niles Holt, „Wilhelm Ostwald's 'The Bridge'”, *British Journal for the History of Science* 10, nr. 2 (1977): 146–150.

incomensurabilitate⁹⁶ și iraționalism, și demonstrează că dovezile empirice sunt arbitrul final al programelor de cercetare concurente.⁹⁷

1.2 Proliferarea teoriilor post-newtoniene

Teoreticienii au formulat un set de criterii fundamentale pe care orice teorie a gravitației ar trebui să le satisfacă, două pur teoretice și două care se bazează pe dovezi experimentale.⁹⁸ Astfel, o teorie trebuie să fie:

1. *completă* (capabilă să analizeze din "primele principii" rezultatul oricărui experiment de interes).
2. *auto-consistentă* (predicția sa pentru rezultatul fiecărui experiment trebuie să fie unică)
3. *relativistă* (la limită când se neglijează gravitația în comparație cu alte interacțiuni fizice, legile non-gravitaționale ale fizicii trebuie să se reducă la legile relativității speciale)
4. *cu limita newtoniană corectă* (în limitele câmpurilor gravitaționale slabe și ale mișcărilor lente, trebuie să reproducă legile lui Newton)

Principalele teorii ale gravitației din perioada 1686-1900, până la dezvoltarea de către Lorentz a propriei teorii și apoi elaborarea teoriilor relativității de către Einstein, sunt

- *Legea gravitației universale a lui Newton* (1686): Teoria lui Newton este considerată a fi exact corectă în limitele câmpurilor gravitaționale slabe și viteze mici și toate celelalte teorii ale gravitației trebuie să reproducă teoria lui Newton în limitele corespunzătoare.
- *Explicațiile mecaniciste* (1650-1900): Teorii bifurcate având ca nucleu dur teoria mecanicistă; au eșuat deoarece majoritatea au condus la o valoare inacceptabilă de mare de tragere a eterului, care nu se confirmă, încalcă legea

⁹⁶ Două teorii sunt incomensurabile dacă sunt încorporate într-un cadru conceptual puternic contrastant, ale cărui limbaje nu se suprapun suficient pentru a permite oamenilor de știință să compare direct teoriile sau să citeze dovezi empirice favorizând o teorie față de cealaltă.

⁹⁷ Gholson și Barker, „Kuhn, Lakatos, and Laudan”.

⁹⁸ Clifford M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, Revised edition (Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993).

privind conservarea energiei și sunt incompatibile cu termodinamica modernă.⁹⁹

- René Descartes (1644) și Christiaan Huygens (1690) au folosit vortexuri pentru a explica mecanicist gravitația.¹⁰⁰ Newton s-a opus teoriei argumentând cu lipsa unor abateri ale orbitelor datorită rezistenței fluidodinamice, direcția uneori diferită a sateliților naturali față de direcția vârtejurilor, și a explicațiilor circulare ale lui Huygens.
- *Modele electrostatice* (1870-1900): S-a încercat combinarea legilor lui Newton cu cele ale electrodinamicii (Weber, Carl Friedrich Gauss, Bernhard Riemann, James Clerk Maxwell), încercând să explice avansul periheliului lui Mercur. Au existat succese parțiale, în 1890 Lévy și în 1898 Paul Gerber, dar au fost respinse pentru că porneau de la ipoteze care s-au dovedit ulterior a fi eronate.¹⁰¹
 - Robert Hooke (1671) și James Challis (1869) au presupus că fiecare corp emite unde ale căror efect este atracția între corpuri. Maxwell a obiectat că această teorie necesită o producție constantă de unde, care trebuie să fie însoțită de un consum infinit de energie. Challis însuși a recunoscut că nu a ajuns la un rezultat precis din cauza complexității proceselor.¹⁰²
 - Inclusiv Isaac Newton (1675), și ulterior Bernhard Riemann (1853) au propus o teorie conform căreia fluxurile eterice mută toate corpurile unul către altul.¹⁰³ Ca și în cazul teoriei lui Le Sage, teoria încalcă legea conservării energiei. De asemenea, apar probleme legate de interacțiunea corpurilor cu eterul.
 - Nicolas Fatio de Duillier (1690) și Georges-Louis Le Sage (1748) au propus un model corpuscular, folosind un fel de mecanism de screening sau de umbrire - o bifurcație a legii lui Newton care respectă legea pătratelor inverse. A fost re-inventată, printre alții, de Lordul Kelvin (1872) și Hendrik Lorentz (1900), și criticată de James Clerk Maxwell (1875) și Henri Poincaré (1908) în special pentru anomaliile

⁹⁹ Grant, *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages*, 60–61.

¹⁰⁰ Christiaan Huygens, *Discours de La Cause de La Pesanteur*, 1885, 443–88.

¹⁰¹ J. Zenneck, „Gravitation”, în *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen: Fünfter Band in Drei Teilen Physik*, ed. A. Sommerfeld (Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1903), 25–67, https://doi.org/10.1007/978-3-663-16016-8_2.

¹⁰² James Challis, *Notes on the Principles of Pure and Applied Calculation: And Applications of Mathematical Principles to Theories of the Physical Forces*. (University of Michigan Library, 1869).

¹⁰³ B. Riemann, *Neue mathematische Prinzipien der Naturphilosophie* (Leipzig: Dedekind, R.; Weber, W., 1876).

termodinamice. Teoria lui Le Sage a fost studiată de Radzievskii și Kagalnikova (1960), Shneiderov (1961), Buonomano și Engels (1976), Adamut (1982), Jaakkola (1996), Tom Van Flandern (1999) și Edwards (2007). O varietate de modele Le Sage și subiecte conexe sunt discutate în Edwards, et al.¹⁰⁴

- Newton a propus o a doua teorie pe baza eterului (1717) dezvoltată ulterior de Leonhard Euler (1760) în care eterul își pierde densitatea în apropierea masei, ducând la o forță netă îndreptată spre corpuri.¹⁰⁵ James Clerk Maxwell a subliniat că în acest model "hidrostatic" "solicitarea pe care trebuie să o presupunem că există în mediul invizibil, este de 3000 de ori mai mare decât cea pe care cel mai puternic oțel ar putea să o suporte".
- Mai târziu, un model similar a fost creat de Hendrik Lorentz, care a folosit radiații electromagnetice în locul corpusculilor.
- Lordul Kelvin (1871) și Carl Anton Bjerknes (1871) au considerat că fiecare corp pulsează, ceea ce ar putea fi o explicație a gravitației și a sarcinilor electrice. Această ipoteză a fost studiată și de George Gabriel Stokes și de Woldemar Voigt. Dar teoria obligă la presupunerea că toate pulsațiile din univers sunt în fază, ceea ce pare foarte improbabil. Iar eterul ar trebui să fie incompresibil. Maxwell a susținut că acest proces trebuie să fie însoțit de o nouă producție și distrugere permanentă a eterului.

Clifford M. Will explică, în *Theory and experiment in gravitational physics*, motivațiile unora din aceste teorii apărute inclusiv după elaborarea relativității generale și a teoriei cuantice,¹⁰⁶ care includ bifurcații ale teoriei inițiale a lui Newton, sau nu satisfac criteriile actuale ale unei teorii gravitaționale, cu observația că este posibil ca, în cazul modificării formelor actuale, unele din aceste teorii să poată satisface ulterior aceste criterii:

¹⁰⁴ Matthew R. Edwards, ed., *Pushing Gravity: New Perspectives on Le Sage's Theory of Gravitation*, y First edition edition (Montreal: Apeiron, 2002).

¹⁰⁵ Leonhard Euler, *Briefe an eine deutsche Prinzessin, aus dem Französischen übersetzt* (Junius, 1773), <https://books.google.ro/books?id=FaMAAAAAMAAJ>.

¹⁰⁶ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

- Teoria Newtoniană a gravitației: nu este relativistă
- Relativitatea cinematică a lui Milne¹⁰⁷: a fost concepută inițial pentru a rezolva anumite probleme cosmologice. Este incompletă - nu face predicția deplasării gravitaționale spre roșu.
- Diferitele teorii vectoriale ale lui Kustaanheimo¹⁰⁸ ¹⁰⁹ conțin un câmp gravitațional vectorial în spațiu-timpul plat. Sunt incomplete - nu pot fi cuplate cu celelalte legi ale fizicii non-gravitaționale (ecuațiile lui Maxwell), decât dacă impunem un spațiu-timp plat. Sunt inconsistente - dau rezultate diferite în propagarea luminii pentru aspectele corpuscular și ondulatoriu ale luminii.
- Teoria lui Poincare (generalizată de Whitrow și Morduch): teoria acțiunii la distanță în spațiu-timpul plat. Este incompletă sau inconsecventă în același mod ca și teoriile lui Kustaanheimo.¹¹⁰
- Teoria vectorială Whitrow-Morduch (1965): conține un câmp gravitațional vectorial în spațiu-timpul plat. Este incompletă sau inconsecventă în același mod ca și teoriile lui Kustaanheimo.¹¹¹
- Teoria lui Birkhoff (1943): conține un câmp gravitațional tensorial utilizat pentru a construi o metrică. Violează limita newtoniană prin condițiile specifice impuse.¹¹²
- Teoria lui Yilmaz (1971, 1973): conține un câmp gravitațional tensorial utilizat pentru a construi o metrică. Este incoerentă din punct de vedere matematic - dependența funcțională a metricilor de câmpul tensorial nu este bine definită.¹¹³

Alte teorii istorice alternative dezvoltate de-a lungul timpului au fost refutate prin verificări experimentale sau înlocuite de teorii mai bine coroborate:

- În 1690, Pierre Varignon a presupus că toate corpurile sunt expuse la împingeri de particule de eter din toate direcțiile, cu o limitare la o anumită distanță de

¹⁰⁷ E. A. Milne, *Kinematic relativity* (Facsimile Publisher, 2015), 566–78.

¹⁰⁸ Paul Edwin Kustaanheimo și V. S. Nuotio, *Relativistic Theories of Gravitation* (Helsingin Yliopisto. Department of Applied Mathematics, 1967).

¹⁰⁹ G. J. Whitrow și G. E. Morduch, „Relativistic theories of gravitation : A comparative analysis with particular reference to astronomical tests”, *Vistas in Astronomy* 6 (1965): 1–67, [https://doi.org/10.1016/0083-6656\(65\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0083-6656(65)90002-4).

¹¹⁰ Whitrow și Morduch, „Relativistic theories of gravitation”.

¹¹¹ Whitrow și Morduch.

¹¹² George D. Birkhoff, „Matter, Electricity and Gravitation in Flat Space-Time”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 29, nr. 8 (1 august 1943): 231–39, <https://doi.org/10.1073/pnas.29.8.231>.

¹¹³ Hüseyin Yilmaz, „New approach to relativity and gravitation”, *Annals of Physics* 81, nr. 1 (1 noiembrie 1973): 81, [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(73\)90485-5](https://doi.org/10.1016/0003-4916(73)90485-5).

suprafața Pământului, sub care corpurile ar experimenta o atracție mai mare spre Pământ.¹¹⁴

- În 1748, Mikhail Lomonosov a presupus că efectul eterului este proporțional cu suprafața completă a componentelor elementare din care este compusă materia.¹¹⁵
- În 1821, John Herapath a încercat să aplice modelul co-dezvoltat al teoriei cinetice a gazelor asupra gravitației. El a presupus că eterul este încălzit de corpuri și apar scăderi de densitate care împing corpurile în acea direcție.¹¹⁶ Taylor a arătat că densitatea scăzută datorată dilatării termice este compensată de viteza crescută a particulelor încălzite; prin urmare, nu apar atracții.
- Teoria gravitației a lui Ritz,¹¹⁷ electrodinamica Weber-Gauss aplicată gravitației. Promovarea clasică a periheliilor.¹¹⁸
- Teoria gravitației a lui Nordström (1912, 1913), un concurent timpuriu al relativității generale.
- Teoria lui Kaluza Klein (1921)¹¹⁹
- Teoria gravitației a lui Whitehead (1922), un alt concurent timpuriu al relativității generale.

Teoria eterului Lorentz s-a dezvoltat din "teoria electronilor" lui Hendrik Lorentz, între 1892 și 1895 considerând un eter complet nemișcat.¹²⁰ Ea a introdus o ipoteză ad-hoc pentru a anula eșecul experimentelor negative de deviere a eterului la primul ordin în v/c introducând o variabilă auxiliară denumită "timp local". Rezultatul negativ al experimentului Michelson-Morley a determinat introducerea unei alte ipoteze ad-hoc, de contracție a lungimii, în 1892. Dar nici experimentele ulterioare nu

¹¹⁴ Pierre (1654-1722) Auteur du texte Varignon, *Nouvelles Conjectures Sur La Pesanteur*, Par M. Varignon,..., 1690, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k74179x>.

¹¹⁵ Mikhail Vasil'evich Lomonosov, *Mikhail Vasil'evich Lomonosov on the Corpuscular Theory*, First edition. edition (Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1970), 224–233.

¹¹⁶ J Herapath, „On the Causes, Laws and Phenomena of Heat, Gases, Gravitation I, II, III, in *Annals of Philosophy, or Magazine of Chemistry, Mineralogy, Mechanics, Natural History, Agriculture and the Arts* 1 Pp. 273–293”, Atticus Rare Books, 1821, 273–93, <https://www.atticusrarebooks.com/pages/books/761/john-herapath/on-the-causes-laws-and-phenomena-of-heat-gases-gravitation-i-ii-iii-in-annals-of-philosophy-or>.

¹¹⁷ Walther Ritz, „Recherches critiques sur l'électrodynamique générale”, *Annales de chimie et de physique*, 1908, 267–71.

¹¹⁸ Ritz, 267–271.

¹¹⁹ Theodor Kaluza, „Zum Unitätsproblem in der Physik | BibSonomy”, 1921, 966–972, <https://www.bibsonomy.org/bibtex/19218e3a965ffaefa3af2d4c14bb5ae52/zhaozh02>.

¹²⁰ Hendrik A. Lorentz, „Considerations on Gravitation”, in *The Genesis of General Relativity*, ed. Michel Janssen et al., Boston Studies in the Philosophy of Science (Dordrecht: Springer Netherlands, 2007), 559–574, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_13.

au confirmat teoria, aceasta ajungând o teorie degenerată conform lui Lakatos. Lorentz a încercat să o revitalizeze în 1899 și 1904 prin introducerea transformării Lorentz. Dar nici noile modele teoretice nu au rezolvat problema eterului. Henri Poincaré a corectat în 1905 erorile și a încorporat efectele non-electromagnetice în teorie, numind-o "Noua mecanică" și folosind pentru prima dată expresia "principiul relativității."¹²¹ A criticat în același timp pe Lorentz pentru că a introdus prea multe ipoteze ajutătoare în teoria sa. Ulterior, Minkowski (1908) și Arnold Sommerfeld (1910) au încercat și ei să dezvolte o lege gravitațională invariantă Lorentz.¹²² Teoria lui Poincaré a rezistat o perioadă datorită puterii sale euristice mai mare, dar a fost învinsă de relativitatea specială lui Albert Einstein, care a și preluat o parte din ideile acestei teorii. Lorentz a recunoscut în 1914 că teoria sa este incompatibilă cu principiul relativității și a respins-o.¹²³ În prezent unii fizicieni consideră teoria lui Lorentz dezvoltată ulterior de Poincaré ca o interpretare specială, lorentziană" sau "neo-lorentziană", a relativității speciale.¹²⁴ Întrucât amândouă folosesc transformările Lorentz și același formalism matematic, nu este posibil să se facă distincția între cele două teorii prin experiment. Diferența între ele este că Lorentz presupune existența unui eter nedetectabil.

Dinamica newtoniană modificată (MOND) este o teorie care propune modificarea legii gravitației universale a lui Newton cu intenția de a ține cont de proprietățile observate ale galaxiilor. MOND încearcă să elimine teoria controversată a materiei întunecate. Ea a fost dezvoltată în 1982 și publicată în 1983 de fizicianul israelian Mordehai Milgrom.¹²⁵ Milgrom a introdus ipoteza că forța gravitațională experimentată de o stea în regiunile exterioare ale unei galaxii este proporțională cu pătratul accelerației centripete (spre deosebire de proporționalitatea simplă, din cea de-a doua lege a lui Newton) sau, alternativ, că forța gravitațională în aceste cazuri variază invers proporțional cu raza (spre deosebire de pătratul invers al razei din legea

¹²¹ Henri Poincaré, „Les Relations Entre La Physique Expérimentale et La Physique Mathématique, in *Revue Générale Des Sciences Pures et Appliquées*”, issue, Gallica, 1900, 1163–1175, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k17075r>.

¹²² Scott Walter, „Breaking in the 4-Vectors: The Four-Dimensional Movement in Gravitation, 1905–1910”, în *The Genesis of General Relativity*, ed. Michel Janssen et al., Boston Studies in the Philosophy of Science (Dordrecht: Springer Netherlands, 2007), 193–252, https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_18.

¹²³ Eduard Prugovecki, „Historical and Epistemological Perspectives on Developments in Relativity and Quantum Theory”, ResearchGate, 1992, https://www.researchgate.net/publication/300434048_Historical_and_Epistemological_Perspectives_on_Developments_in_Relativity_and_Quantum_Theory.

¹²⁴ Quentin Smith, *Einstein, Relativity and Absolute Simultaneity*, ed. William Lane Craig, 1 edition (London: Routledge, 2007).

¹²⁵ M. Milgrom, „A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis”, *The Astrophysical Journal* 270 (iulie 1983): 371–389, <https://doi.org/10.1086/161130>.

gravitației lui Newton). În MOND, modificarea legilor lui Newton are loc doar pentru deplasarea galaxiilor, la accelerații extrem de mici.

MOND a prezis cu succes fenomene galactice neexplicate prin teoria materiei întunecate,¹²⁶ dar nu reușește să confirme proprietățile clusterelor de galaxii, și nici să dezvolte un model cosmologic care să concure cu actualul model Λ CDM.¹²⁷ Măsurarea exactă a vitezei undelor gravitaționale în comparație cu viteza luminii din 2017 nu a exclus teoriile MOND.

O mare varietate de fenomene astrofizice sunt coroborate prin MOND,^{128 129} precum:

- relație concretă între masa barionică totală a galaxiei și viteza de rotație asimptotică conform predicției MOND.
- MOND prezice o corelație mult mai bună între caracteristici în distribuția masei nebarionice și curba de rotație decât ipoteza materiei întunecate, observată în mai multe galaxii spirale.
- MOND prezice o relație specifică între accelerația stelelor la orice distanță de centrul unei galaxii și cantitatea de materie întunecată din această rază care ar fi dedusă în o analiză newtoniană, predicție verificată observațional.
- Confirmă stabilitatea galaxiilor disc pentru regiunile de galaxii din cadrul regimului MOND profund.
- Pentru galaxiile deosebit de masive MOND prezice că curba de rotație ar trebui să scadă cu $1/r$, în conformitate cu legea lui Kepler, confirmată de observațiile galaxiilor eliptice cu masă mare.

Din teoria MOND inițială au fost bifurcate o serie de teorii concurente care se bazează pe același nucleu dur (euristica negativă) dar cu strategii de dezvoltare (euristici pozitive) diferite:

¹²⁶ Stacy S. McGaugh, „A tale of two paradigms: the mutual incommensurability of Λ CDM and MOND”, *Canadian Journal of Physics* 93, nr. 2 (21 aprilie 2014): 250–259, <https://doi.org/10.1139/cjp-2014-0203>.

¹²⁷ Pavel Kroupa, *The vast polar structures around the Milky Way and Andromeda*, 2013, <https://www.youtube.com/watch?v=UPVGDXNSBZM>.

¹²⁸ Benoit Famaey și Stacy McGaugh, „Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational Phenomenology and Relativistic Extensions”, *Living Reviews in Relativity* 15, nr. 1 (decembrie 2012): 10, <https://doi.org/10.12942/lrr-2012-10>.

¹²⁹ Mordehai Milgrom, „MOND laws of galactic dynamics”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 437, nr. 3 (21 ianuarie 2014): 2531–41, <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2066>.

- AQUAL a fost dezvoltată în 1984 de Milgrom și Jacob Bekenstein,¹³⁰ generând comportamentul MOND prin modificarea termenului gravitațional în lagrangeanul clasic.
- QUMOND¹³¹ introduce o distincție între câmpul de accelerare MOND și câmpul de accelerare newtonian.
- TeVeS pornește de la comportamentul MOND dar ia în considerare un cadru relativist. TeVeS a avut succes în observațiile lentilelor gravitaționale și formarea structurii, dar nu reușește să explice alte aspecte cosmologice.¹³²

Există și alte generalizări alternative relativiste ale MOND, precum BIMOND și teoriile generalizate Einstein-Eter.¹³³

Efectul de câmp extern presupune o rupere fundamentală a lui MOND de principiul echivalenței puternice (dar nu neapărat de principiul slabei echivalențe), acesta fiind recunoscut ca un element crucial al paradigmei MOND.

Susținătorii teoriei MOND au propus mai multe teste observaționale și experimentale pentru a ajuta la a stabili cea mai bine coroborată teorie¹³⁴ dintre modelele MOND și materia întunecată, precum: existența unor accelerații anormale pe Pământ care ar putea fi detectate într-un experiment de precizie;¹³⁵ testarea în sistemul solar utilizând misiunea LISA Pathfinder prin observarea mareelor prezise de MOND și a unui punctul de sa Pământ-Soare al potențialului gravitațional newtonian;¹³⁶ măsurarea corecțiilor MOND la precesiunea periheliului planetelor din Sistemul Solar;¹³⁷ un test astrofizic pentru a investiga comportamentul galaxiilor izolate, și

¹³⁰ J. Bekenstein și M. Milgrom, „Does the Missing Mass Problem Signal the Breakdown of Newtonian Gravity?”, *The Astrophysical Journal* 286 (noiembrie 1984): 7–14, <https://doi.org/10.1086/162570>.

¹³¹ Mordehai Milgrom, „Quasi-linear formulation of MOND”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 403, nr. 2 (4 februarie 2010): 886–95, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16184.x>.

¹³² Jacob D. Bekenstein, „Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm”, *Physical Review D* 71, nr. 6 (14 martie 2005): 069901, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.069901>.

¹³³ Famaey și McGaugh, „Modified Newtonian Dynamics (MOND)”.

¹³⁴ John F. Wallin, David S. Dixon, și Gary L. Page, „Testing Gravity in the Outer Solar System: Results from Trans-Neptunian Objects”, *The Astrophysical Journal* 666, nr. 2 (10 septembrie 2007): 1296–1302, <https://doi.org/10.1086/520528>.

¹³⁵ V. A. De Lorenci, M. Faundez-Abans, și J. P. Pereira, „Testing the Newton second law in the regime of small accelerations”, *Astronomy & Astrophysics* 503, nr. 1 (august 2009): L1–4, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811520>.

¹³⁶ Christian Trenkel et al., „Testing MOND/TEVES with LISA Pathfinder”, *arXiv:1001.1303 [astro-ph]*, 8 ianuarie 2010, <http://arxiv.org/abs/1001.1303>.

¹³⁷ Luc Blanchet și Jerome Novak, „Testing MOND in the Solar System”, *arXiv:1105.5815 [astro-ph, physics:gr-qc]*, 29 mai 2011, <http://arxiv.org/abs/1105.5815>.

comportamentul non-newtonian în sistemele de stele binare; testarea folosind dependența de deplasarea spre roșu a accelerației radiale.¹³⁸

"**A cincea forță**" este o teorie care modifică legea lui Newton a gravitației universale. Experimentele inițiale au dat rezultate contradictorii: unul a susținut existența celei de-a cincea forțe, în timp ce celălalt a contrazis această teorie. După numeroase repetări ale experimentului, discordia a fost rezolvată și în consens s-a ajuns la concluzia că Forța a cincea nu există.¹³⁹

1.3 Teste ale teoriilor post-newtoniene

1.3.1 Teste propuse de Newton

În prima ediție a Principiei, Newton a considerat că experimentele cu **pendulul** i-ar permite să descifreze diferitele tipuri de forță de rezistență și variația lor cu viteza. Recunoaște eșecul acestor experimente, în edițiile a doua și a treia, apelând apoi la căderea verticală a obiectelor cu forțele de rezistență datorate inerției mediului. Intenția sa era ca celelalte tipuri să fie abordate folosind diferențele dintre observații și această lege.¹⁴⁰ Dar și această abordare a fost greșită, întrucât nu există o specie distinctă de forță de rezistență, ci doar un rezultat al interacțiunii cu mediul inerțial și vâscos. Această interacțiune fiind foarte complexă, Newton nu a putut deduce o lege pentru forța de rezistență, a determinat doar empiric relații pentru corpuri de diferite forme.¹⁴¹

Newton susține în legea gravitației proporționalitatea strictă a "cantității de materie" cu greutatea, dar experimentele pendulului indică doar faptul că masa inerțială este proporțională cu greutatea.¹⁴² Masa unui obiect este o caracteristică intrinsecă a acestuia, în timp ce greutatea este o caracteristică extrinsecă, depinzând de câmpurile gravitaționale generate de alte obiecte. Experimentele cu pendulul sunt descrise în detaliu în Cartea III, Propoziția 6, unde Newton afirmă: "Toate corpurile gravitează spre fiecare dintre planete și, la orice distanță dată de centrul oricărei

¹³⁸ Sabine Hossenfelder și Tobias Mistele, „The Redshift-Dependence of Radial Acceleration: Modified Gravity versus Particle Dark Matter”, *International Journal of Modern Physics D* 27, nr. 14 (octombrie 2018): 1847010, <https://doi.org/10.1142/S0218271818470107>.

¹³⁹ Michele Cicoli, Francisco G. Pedro, și Gianmassimo Tasinato, „Natural Quintessence in String Theory”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, nr. 07 (23 iulie 2012): 044–044, <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/07/044>.

¹⁴⁰ Newton, „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed.”, 749.

¹⁴¹ L. D. Landau și E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics: Volume 6*, 2 edition (Amsterdam u.a: Butterworth-Heinemann, 1987), 31–36, 168–79.

¹⁴² Newton, „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, III Ed.”, 701, 806–9.

planete, greutatea oricărui corp, indiferent de planeta respectivă, este proporțională cu cantitatea de materie pe care corpul o conține,"¹⁴³ și apoi descrie experimentele sale.¹⁴⁴

Newton afirmă, în contradicție cu viziunea carteziană, că fiecare dintre proprietățile universale și esențiale pentru materie - și anume extensie, mobilitate, duritate, impenetrabilitate și masă - este cunoscută "numai prin simțuri". Dar, din afirmația sa că proprietățile materiei sunt cunoscute "numai prin experimente", rezultă că Newton nu acceptă o viziune naiv-empirică, ci mai degrabă o concepție sofisticată dublă a epistemologiei materiei,¹⁴⁵ negând viziunea cartesiană că putem determina proprietățile universale ale materiei doar *a priori* sau numai prin rațiune, și susținând că sunt necesare experimente ghidate de concepte în teoria fizică pentru a determina proprietățile materiei: "Aceasta [masa] poate fi întotdeauna cunoscută din greutatea unui corp, deoarece - făcând experimente foarte precise cu pendulele - am găsit că este proporțională cu greutatea."¹⁴⁶ Conceptul de materie al lui Newton a implicat o respingere fundamentală a filosofiei mecaniciste. Experimentele cu pendulul sunt descrise, de asemenea, în Propoziția 24 din Cartea 2, în al corolarele cinci și șapte.

În experimentele cu pendulul, comparând numărul de oscilații ale bobilor pendulului solid și ale pendulului gol, Newton a încercat să determine modul în care un eter care nu acționează numai pe suprafața unui corp ci și pe părțile sale interioare, afectează aceste pendule. Așa a ajuns Newton să creadă că nu există eter și a favorizat ideea din Prefața *Principiilor*, a universalității gravitației.¹⁴⁷

Pentru a discuta efectele care disting mișcarea absolută de mișcarea relativă, Newton apelează la experimentul de gândire al "**găleții de apă**", descris într-un paragraf cu privire la "efectele care disting mișcarea absolută de mișcarea relativă". Newton afirmă aici că "mișcarea circulară reală și absolută a apei... poate fi măsurată prin această încercare."¹⁴⁸ Suspendați o găleată de apă cu o frânghie și răsuciți mult găleata într-o direcție; apoi lăsați frânghia să își revină. Găleata se rotește acum, iar suprafața apei va fi inițial plată, dar în raport cu găleata se rotește. Prin frecare cu găleata care se rotește, apa începe treptat să se rotească și ea, echilibrând în cele din urmă viteza găleții, astfel încât mișcarea față de găleată să ajungă treptat zero. Dar, pe măsură ce rotația relativă a apei față de găleată scade, "efortul său de a se retrage de pe

¹⁴³ Newton, 806.

¹⁴⁴ Newton, 806-7.

¹⁴⁵ Janiak, *Newton as Philosopher*.

¹⁴⁶ Newton, „*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, III Ed.”, 404.

¹⁴⁷ Newton, 382-83.

¹⁴⁸ Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, II Ed., 21.

axa mișcării" crește în mod corespunzător. Newton observă că accelerația (de exemplu, rotația) este detectabilă empiric prin prezența efectelor inerțiale, chiar și în absența unei schimbări a relațiilor obiect. De asemenea, Newton susține, contrar lui Descartes, că nu putem înțelege mișcarea adevărată a apei din găleată ca fiind o schimbare a relațiilor dintre apă și un corp înconjurător (în acest caz, găleata). Relația dintre apă și găleată rămâne aceeași, în ciuda faptului că apa are mișcare adevărată, așa cum este indicat de prezența efectelor inerțiale. Deci, mișcarea adevărată a unui corp nu poate fi înțeleasă în termeni de schimbări în relațiile sale cu alte obiecte. Spațiul absolut ne permite să surprindem ceea ce este adevărata mișcare, conform lui Newton.¹⁴⁹

Pentru Newton, se pare că forța centrifugă este criteriul și măsura rotației absolute. El definește rotația absolută ca fiind cea care produce un astfel de efect, criticând definiția lui Descartes a "mișcării în sensul filosofic" ca mișcare a unui corp în raport cu corpurile învecinate. Experimentul arată că efectul dinamic este independent de mișcarea relativă dintre apă și găleată.¹⁵⁰ Newton demonstrează în final că, deoarece depinde de forțe fizice identificabile, definiția lui poate fi aplicată în mod consecvent chiar și în absența corpurilor de referință observabile, pentru că dacă două corpuri legate de un cordon sunt singure într-un univers altfel gol, tensiunea pe cablu încă oferă un criteriu și o măsură a cantității de mișcare circulară adevărată.¹⁵¹

Un alt experiment de gândire al lui Newton a presupus **două corpuri legate de un cordon**,¹⁵² care se rotesc în jurul centrului lor de greutate comun, în lipsa altor corpuri care să poată influența mișcările lor. "Efortul de a se retrage de pe axa mișcării ar putea fi cunoscut din tensiunea cordonului, și astfel cantitatea de mișcare circulară ar putea fi calculată." Respectiv, rotația absolută a unui corp nu este numai independentă de rotația sa în raport cu corpurile contigue, ci este independentă și față de orice rotație relativă.

Potrivit lui Ernst Mach, la două sute de ani după Newton, dacă Newton a neglijat corpurile învecinate, a referit toate mișcările la "stelele fixe". Dar dacă putem deduce din legile lui Newton cum se vor comporta corpurile în absența stelelor fixe, nu putem deduce dacă, în aceste circumstanțe, ele vor rămâne valabile oricum. Pentru Einstein,

¹⁴⁹ Janiak, *Newton as Philosopher*.

¹⁵⁰ Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, II Ed., 21.

¹⁵¹ Newton, 22.

¹⁵² Cohen și Smith, *The Cambridge Companion to Newton*, 44.

sub influența lui Mach, argumentul lui Newton ilustrează "defectul epistemologic" inherent al fizicii newtoniene.¹⁵³

În Propunerile 26-29, Cartea 3, din *Principia* 1687,¹⁵⁴ Newton a dezvoltat un tratament special al influenței forței gravitaționale a Soarelui asupra **mișcării Lunii** în jurul Pământului. Tycho Brahe descoperise o variație bi-lunară a vitezei lunare după ce a dispărut o eclipsă lunară așteptată. În mod remarcabil, Newton nu a considerat mișcarea reală a Lunii, despre care se știe că este aproximată de modelul lui Horrocks de o elipsă de precesie cu Pământul într-un singur focar. El a considerat un model idealizat în care Luna se rotește într-o orbită circulară în jurul Pământului în absența perturbației solare. A calculat schimbarea orbitei din cauza acestei perturbații și a obținut rezultate care erau în acord cu observația lui Brahe. Acesta a fost unul dintre marile triumfuri ale teoriei gravitaționale a lui Newton, dezvoltat în continuare de Euler,¹⁵⁵ și de G. Hill.¹⁵⁶

Teoria lui Newton a avut cel mai mare succes când a fost folosită pentru a prezice existența lui **Neptun** pe baza mișcărilor lui Uranus, care nu puteau fi explicate prin acțiunile celorlalte planete. Calculele lui John Couch Adams și Urbain Le Verrier au prezis poziția generală a planetei, iar calculele lui Le Verrier au condus pe Johann Gottfried Galle la descoperirea lui Neptun.¹⁵⁷

Teoria gravitației lui Newton este mai bună decât teoria a lui Descartes deoarece teoria lui Descartes a fost refutată (s-a dovedit a fi falsă) în explicarea mișcării planetelor. Teoria lui Newton a fost la rândul ei refutată de periheliul anormal al lui Mercur. Chiar dacă elipsele kepleriene au respins teoria carteziană a vârtejurilor, numai teoria lui Newton ne-a determinat să o respingem; și chiar dacă periheliul lui Mercur a respins gravitația newtoniană, numai teoria lui Einstein ne-a făcut să o respingem. O refuzare nu face decât să indice nevoia urgentă de a revizui actuala teorie, dar nu este un motiv suficient pentru a elimina teoria.

¹⁵³ Cohen și Smith, *The Cambridge Companion to Newton*.

¹⁵⁴ Newton, „*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, I Ed.”

¹⁵⁵ Leonhard Euler, *Sol et Luna I: Opera Mechanica Et Astronomica Vol 23*, ed. Otto Fleckenstein, 1956 edition (Basileae: Birkhäuser, 1956), 286–289.

¹⁵⁶ G. W. Hill, „The Collected Mathematical Works of G. W. Hill”, *Nature* 75, nr. 1936 (decembrie 1906): 284–335, <https://doi.org/10.1038/075123a0>.

¹⁵⁷ John Couch Adams, „On the Perturbations of Uranus (1841-1846). | StJohns”, 1846, 265, <https://www.joh.cam.ac.uk/w16-manuscripts-john-couch-adams-perturbations-uranus-1841-1846>.

1.3.2 Teste ale teoriilor post-newtoniene

În mod obișnuit, "laboratorul" testelor gravitaționale a fost corpurile cerești, sistemele astrofizice. Dar astfel de teste sunt perturbate de efecte non-gravitaționale. Cel mai utilizat astfel de "laborator" a fost sistemul solar. De curând, oamenii de știință s-au concentrat pe observarea pulsarilor binari pentru verificarea teoriilor gravitaționale, prin observațiile privind variațiile perioadei orbitale, furnizând astfel dovezi indirecte pentru emisia de radiație gravitațională.

Dar experimentatorul nu poate "aranja laboratorul" după nevoile sale, și nici declanșa anumite evenimente atunci când are nevoie de ele. Însă actuala dezvoltare tehnologică începe să permită experimente pure de laborator. Astfel s-a ajuns la construcția detectorilor rezonanți (oscilatori armonici) cu niveluri foarte scăzute de disipare. În cadrul acestor teste de laborator, un tip de experimente este cel pentru verificarea efectelor gravitaționale post-newtoniene. În acest scop, o masă de dimensiuni de laborator este pusă în mișcare (prin rotație sau vibrație) astfel încât să producă în vecinătatea ei un "câmp gravitațional post-newtonian" (câmpuri gravitaționale de tip newtonian produse de energie cinetică sau de presiune). Mișcarea masei este modulată astfel încât semnalul post-newtonian dorit să conducă în mod rezonant oscilațiile detectorului și experimentatorul să monitorizeze modificările rezultate în mișcarea detectorului.¹⁵⁸

Prin aceste experimente se pot examina numai anumite tipuri de efecte post-newtoniene. Unele efecte post-newtoniene (precum efectele gravitaționale neliniare) sunt complet neglijabile. Dar este posibil să se verifice influențele gravitaționale ale vitezei și presiunii. În aceste experimente post-newtoniene se încearcă eliminarea "zgomotului newtonian", efectele câmpul gravitațional newtonian al sursei de laborator care sunt mult mai mari decât cele mai mari efecte post-newtoniene.

1.4 Anomalii ale gravitației newtoniene

Legea lui Newton a gravitației este suficient de precisă pentru scopuri practice. Abaterile sunt mici când cantitățile adimensionale $\varphi/c^2 \ll 1$ și $(v/c)^2 \ll 1$, unde φ este potențialul gravitațional, v este viteza obiectelor studiate și c este viteza luminii.¹⁵⁹ În caz contrar, trebuie utilizată relativitatea generală pentru a descrie sistemul. Legea lui

¹⁵⁸ Carlton Morris Caves, „Theoretical investigations of experimental gravitation” (phd, California Institute of Technology, 1979), <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.

¹⁵⁹ Charles W. Misner, Kip S. Thorne, și John Archibald Wheeler, *Gravitation* (W. H. Freeman, 1973), 1049.

Newton a gravitației este limita gravitațională a relativității generale în condițiile specificate mai înainte.

În privința legii lui Newton, există încă preocupări teoretice actuale: nu există încă un consens privind medierea interacțiunii gravitaționale (dacă există sau nu acțiune la distanță). De asemenea, teoria lui Newton implică o propagare instantanee a interacțiunii gravitaționale, altfel ar apărea o instabilitate a orbitelor planetare.

Teoria lui Newton nu a putut explica precesiunea exactă a periheliului orbitelor planetelor, în special pentru planeta Mercur, care a fost detectată mult după ce a murit Newton.¹⁶⁰ Diferența de 43 arcsecunde pe secol apare din observațiile celorlalte planete și din precesia observată cu telescoape avansate în secolul 19.

Deflecția unghiulară a razelor de lumină datorită gravitației, calculată prin utilizarea teoriei lui Newton, este jumătate din deflecția observată de astronomi. Relativitatea generală prezice valori mult mai apropiate de cele observaționale.

În galaxiile spiralate, orbitarea stelelor în jurul centrelor lor pare să nu respecte cu exactitate legea lui Newton de gravitație universală. Astrofizicienii au introdus unele ipoteze ad-hoc pentru punerea de acord a acestui fenomen cu legile lui Newton, presupunând existența unor cantități mari de materie întunecată.

Newton însuși a fost incomodat de conceptul de "acțiune la distanță" pe care îl implicau ecuațiile sale. În 1692, în a treia scrisoare adresată lui Bentley, el a scris: "Un corp care poate acționa asupra altuia la distanță, prin vid, fără medierea a altceva, de și prin care acțiunea și forța lor pot fi transmise una după alta, pentru mine este o absurditate atât de mare încât, cred, niciun om care are în materie filosofică o capacitate de gândire competentă nu ar putea să creadă vreodată în ea."^{161 162}

Newton nu a reușit să emită o teorie fenomenologică, care să fie confirmată experimental, despre cum acționează gravitația, deși a sugerat două ipoteze mecanice în 1675 și 1717. În Scholium General în cea de-a doua ediție a *Principia* din 1713, spunea: "Nu am reușit încă să descopăr cauza fenomenelor acestor proprietăți ale gravitației și nu nascocesc ipoteze... Este suficient că gravitația există într-adevăr și că

¹⁶⁰ Max Born, *Einstein's Theory of Relativity*, Revised edition edition (New York: Dover Publications Inc., 1962), 348.

¹⁶¹ I. Bernard Cohen, „Isaac Newton's Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents”, *Philosophy of Science* 27, nr. 2 (1960): 209–211.

¹⁶² Sfetcu, *Isaac Newton despre acțiunea la distanță în gravitație - Cu sau fără Dumnezeu?*

acționează în conformitate cu legile pe care le-am explicat și că ajută din plin la explicarea tuturor mișcărilor corpurilor cerești."¹⁶³

1.5 Punctul de saturație în gravitația newtoniană

La sfârșitul secolului 20 și începutul secolului 21, deveniseră evidente contradicțiile dintre mecanica newtoniană și electrodinamica lui Maxwell (dintre invarianța galileeană și ideea constanței vitezei luminii). O soluție propusă inițial a fost conceptul de eter. Einstein a respins această soluție, interpretând teoriile lui Newton și Maxwell ca fiind atât de fundamentale, fiecare cu modelul său rival, încât singura rezolvare a fost dezvoltarea unei noi teorii unificatoare, cu alt nucleu dur și o euristică pozitivă specifică: relativitatea specială.

Nicholas Maxwell¹⁶⁴ discută șase discrepanțe ale mecanicii newtoniene evidențiate de Einstein¹⁶⁵ (care ar putea fi denumite anomalii în cadrul programului lui Lakatos), și anume:

1. arbitraritatea cadrelor de referință inerțiale și conceptul de spațiu absolut;
2. două legi fundamentale distincte, (a) legea mișcării ($F = ma$) și (b) expresia forței gravitaționale ($F = Gm_1m_2/d^2$);
3. arbitraritatea lui (b) fiind dat (a), existând o infinitate de posibilități la fel de bune pentru (b);
4. posibilitatea ca legea forței să fie determinată de structura spațiului și eșecul de a exploata această posibilitate;
5. caracterul ad-hoc al egalității masei inerțiale cu cea gravitațională; și
6. caracterul nenatural al energiei fiind împărțit în două forme, cinetică și potențială.

Einstein explică de ce eșuează încercările de rezolvare a anomaliilor prin ipoteze ad-hoc, și concluzionează: "În consecință, revoluția începută de introducerea câmpului nu a fost finalizată. Apoi s-a întâmplat ca, la începutul secolului ... o a doua criză

¹⁶³ Newton, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, II Ed.

¹⁶⁴ Nicholas Maxwell, „The Need for a Revolution in the Philosophy of Science”, *Journal for General Philosophy of Science* 33, nr. 2 (1 decembrie 2002): 381–408, <https://doi.org/10.1023/A:1022480009733>.

¹⁶⁵ Albert Einstein, „Autobiographische Skizze”, în *Helle Zeit — Dunkle Zeit: In memoriam Albert Einstein*, ed. Carl Seelig (Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1956), 27–31, https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1_2.

fundamentală să apară", criza generată de începuturile teoriei cuantice, prima fiind dualismul particule/câmpuri în fizica clasică.¹⁶⁶

În plus, programul clasic al lui Lorentz a fost progresiv până în 1905 - anul în care Einstein și-a publicat teoria relativității speciale.

Nugayev afirmă că programul de cercetare susținut de Einstein a fost mult mai larg, incluzând relativitatea, teoria cuantică și mecanica statistică, pentru unificarea mecanicii și a electrodinamicii.¹⁶⁷

Majoritatea explicațiilor privind victoria programului lui Einstein de cercetarea asupra celui al lui Lorentz fac referire la experimentul Michelson-Morley.¹⁶⁸ Elie Zahar¹⁶⁹, pe baza metodologiei lui Lakatos,¹⁷⁰ afirmă că teoriile eterice ale lui Lorentz și teoriile speciale și generale ale relativității lui Einstein au fost dezvoltate în programe diferite concurente. Conform lui Zahar, programul lui Lorentz a fost înlocuit de programul de relativitate al lui Einstein abia în 1915 prin explicarea precesiei periheliului lui Mercur. Doar odată cu dezvoltarea TGR programul lui Einstein a prezis observații care nu puteau fi derivate din cel al lui Lorentz.¹⁷¹

Nugayev, argumentând împotriva extensiei lui Zahar a metodologiei lui Lakatos, își propune să explice succesul programului de cercetare al lui Einstein asupra celui al lui Lorentz printr-o extindere diferită a metodologiei lui Lakatos, inclusiv diferită de cea propusă de mine. Astfel, pentru două teorii diferite care încearcă să explice aceleași date experimentale, procesul aplicării comune a celor două teorii pentru rezolvarea unei probleme va fi numit "cruce", în timp ce acestea vor fi numite "teorii încrucișate". Setul de afirmații care descrie relațiile dintre încrucișări va primi numele de "teorie transversală".¹⁷² Nugayev abordează și el ideea unei teorii pe care eu am numit-o "unificatoare", atunci când teoriile trec, prin "contradicții încrucișate". Nugayev numește noua teorie "globală". Conform acestuia, ar exista două moduri logice de elaborare a teoriei globale: "reducționist" și "sintetic".

Nugayev afirmă că nucleeele dure ale lui Lakatos sunt obținute prin convenție. Aici nu sunt de acord cu el. Nucleul dur este stabilit de însuși inițiatorul programului

¹⁶⁶ Einstein, 27–31.

¹⁶⁷ R. M. Nugayev, „The History of Quantum Mechanics as a Decisive Argument Favoring Einstein Over Lorentz”, *Philosophy of Science* 52, nr. 1 (1985): 44–63.

¹⁶⁸ Gerald Holton, „Einstein, Michelson, and the «Crucial» Experiment”, *Isis: A Journal of the History of Science* 60 (1969): 132–97.

¹⁶⁹ Zahar, „Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's?”

¹⁷⁰ Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*.

¹⁷¹ Nugayev, „The History of Quantum Mechanics as a Decisive Argument Favoring Einstein Over Lorentz”.

¹⁷² Nugayev.

de cercetare care stabilește și strategia de dezvoltare a programului în funcție de euristica negativă. Nucleul dur este ceea ce acesta dorește să rămână neclintit, fiind absolut convins că este corect. În momentul în care ar modifica nucleul dur, practic ar renunța la acel program de cercetare și ar începe un alt program.

2. Relativitatea generală

Interpretările filosofice timpurii ale teoriei generale a relativității sunt foarte diverse, fiecare încercând să identifice pe Einstein ca un adept al respectivei filosofii. Adepții lui Mach au evidențiat încercarea lui Einstein de a pune în aplicare o "relativizare a inerției" în teoria generală, și tratamentul lui operaționalist pentru simultaneitate. Kantienii și neo-kantienii au arătat importanța unor "forme intelectuale" sintetice în teoria generală, în special principiul covarianței generale. Empiriștii logici au pus accentul pe metodologia teoriei, a convențiilor pentru a exprima conținutul empiric.¹⁷³

Bertrand Russell a observat că

"A existat o tendință, nu neobișnuită în cazul unei noi teorii științifice, ca fiecare filosof să interpreteze lucrarea lui Einstein în conformitate cu propriul său sistem metafizic și să sugereze că rezultatul este o mare aderare a puterii la opiniile pe care filosoful în cauză a avut loc anterior. Acest lucru nu poate fi adevărat în toate cazurile; și se poate spera că nu este adevărat în niciunul. Ar fi dezamăgitor dacă o schimbare fundamentală așa cum a introdus-o Einstein nu ar implica nicio noutate filosofică."¹⁷⁴

Majoritatea lucrărilor timpurii ale lui Einstein dezvăluie că acesta este un susținător al lui Ludwig Boltzmann, mai degrabă decât al lui Ernst Mach, în dezbaterea asupra atomismului.¹⁷⁵ Cu toate acestea, în 1912, numele lui Einstein a fost afișat printre aceia care au aderat la Mach într-o chemare la formarea unei "Societăți pentru filosofia pozitivistă". La sfârșitul vieții,¹⁷⁶ Einstein a scris despre "influența profundă" exercitată asupra lui de către Școala lui Mach de mecanică, și despre influența foarte mare din tinerețe a "poziției epistemologice a lui Mach". Declarațiile ocazionale epistemologice și metodologice par să indice acordul cu părțile esențiale ale doctrinei pozitivistice a lui Mach.¹⁷⁷ Ideea lui Mach că masa și mișcarea inerțială a corpului rezultă

¹⁷³ Thomas A. Ryckman, „Early Philosophical Interpretations of General Relativity”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Spring 2018 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018), <https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/genrel-early/>.

¹⁷⁴ Bertrand Russell, *Relativity: Philosophical Consequences*, in *Encyclopaedia Britannica: Thirteenth Edition Volume 31* (ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA PRESS, 1926), 331.

¹⁷⁵ Thomas Ryckman, *Einstein*, 1 edition (London ; New York: Routledge, 2011), cap. 3.

¹⁷⁶ Einstein, „Autobiographische Skizze”, 21.

¹⁷⁷ Albert Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, 23. Aufl. 2001. Nachdruck (Berlin: Springer, 2002).

din influența tuturor celorlalte mase înconjurătoare a fost probabil cea mai puternică motivație a dezvoltării unei teorii relativiste a gravitației.¹⁷⁸

Un pasaj din prima expunere completă a lui Einstein, a arătat că cerința lui de covarianță generală pentru ecuațiile câmpului gravitațional (adică faptul că acestea rămân neschimbate sub transformarea arbitrară, dar continuu adecvată a coordonatelor spațiu-timp), "îndepărtează din spațiu și timp ultima rămășiță a obiectivității fizice". Josef Petzoldt, un filosof machian, a remarcat că Einstein este cel mai bine caracterizat ca pozitivist relativist.¹⁷⁹ Filosofia contemporană a arătat că remarcile lui Einstein au fost doar referiri eliptice la un "argument al găurii", conform căruia dacă o teorie este în general covariantă, punctele goale ale manifestăției spațio-temporale nu pot avea o identitate primitivă inerentă, și deci nici o realitate independentă.¹⁸⁰ Astfel, pentru o teorie general covariantă, nicio realitate fizică nu se acumulează în "spațiul gol" în absența câmpurilor fizice, idee care nu este o susținere a fenomenalismului pozitivist.

Relativizarea tuturor efectelor inerțiale ("principiu al lui Mach"), împreună cu principiul relativității generale interpretat de Einstein drept principiul covarianței generale, și cu principiul echivalenței, au fost considerate de Einstein cele trei principii piloni pe care s-a bazat teoria sa.

Portretele retrospective ale metodologiei lui Einstein în geneza relativității generale se focalizează pe ideea unei strategii care ține cont de estetica matematică.¹⁸¹ Pozitiviștii și operaționaliștii au argumentat cu analiza simultaneității a lui Einstein ca element metodologic fundamental al teoriei relativității.

Filosofii kantieni nu au acordat o mare atenție teoriei relativității. Cassirer vede teoria generală a relativității ca o confirmare a principiilor fundamentale ale idealismului transcendent.¹⁸² Natorp¹⁸³ a apreciat principiul relativității ca fiind consecvent cu kantianismul prin distincția dintre conceptele transcendente ideale,

¹⁷⁸ Ryckman, „Early Philosophical Interpretations of General Relativity”.

¹⁷⁹ Joseph Petzoldt, Giora Hon, și Ernst Mach, *Der Verhältnis der Machschen Gedankenwelt zur Relativitätstheorie, an appendix to Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt* (Xenomi Verlag, 1921), 516.

¹⁸⁰ John D. Norton, „General Covariance and the Foundations of General Relativity: Eight Decades of Dispute”, *Reports of Progress in Physics* 56 (1993): 791–858.

¹⁸¹ Thomas Ryckman, „A Believing Rationalist”, *The Cambridge Companion to Einstein*, mai 2014, 377–420, <https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.014>.

¹⁸² Ernst Cassirer, W. C. Swabey, și M. C. Swabey, *Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity* (Courier Corporation, 2003), 172–73.

¹⁸³ Paul Natorp, *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften* (Sändig Reprint, H. R. Wohlwend, 1910), 399–404.

pur matematice ale spațiului și timpului și măsurătorile fizice relative ale acestora. Din această relativizare, afirmă Natorp, rezultă că "evenimentele sunt ordonate nu în raport cu timpul absolut, ci numai ca fenomene determinate în relația reciprocă temporală, o versiune a relaționismului leibnizian."¹⁸⁴ De asemenea, constanța vitezei luminii, considerată o presuposiție empirică, "a reamintit că determinările absolute ale acestor măsurători, care nu pot fi atinse în știința naturală empirică, ar necesita o obligație absolută corespunzătoare."¹⁸⁵ Natorp a considerat cerința de invarianță a legilor naturii cu privire la transformările Lorentz ca "poate cel mai important rezultat al anchetei lui Minkowski."¹⁸⁶

O serie de poziții neo-kantiene, dintre care cea a lui Marburg și Bollert,¹⁸⁷ au susținut că teoria relativității a clarificat poziția kantiană în estetica transcendentă demonstrând că nu spațiul și timpul, ci spațialitatea (determinitatea în ordinea pozițională) și temporalitatea (în ordinea succesiunii) sunt condiții *a priori* de cunoaștere fizică. Această revizuire a condițiilor de obiectivitate este esențială pentru idealismul critic.

Cea mai influentă interpretare neo-kantiană a relativității generale a fost *Zur Einsteinschen Relativitätstheorie*¹⁸⁸ a lui Ernst Cassirer, în care se considera teoria ca fiind un test crucial pentru Erkenntnistheorie (epistemologia științelor fizice ale idealismului transcendent al lui Marburg). Recunoscând cerința unei covarianțe generale, Cassirer a afirmat că teoria generală a relativității, cu coordonatele spațiului și timpului, reprezintă doar "simboluri ale evenimentelor ("coincidente"), variabile independente ale funcțiilor matematice (câmp) care caracterizează fizic mărimea stării".¹⁸⁹ Covarianța generală ar fi cea mai recentă rafinare a principiului metodologic al "unității de determinare" care determină cunoașterea fizică prin trecerea de la concepte de substanță la concepte funcționale și relaționale. Cassirer a concluzionat că teoria generală a relativității prezintă "cea mai determinată aplicație și realizare în cadrul științei empirice a poziției idealismului critic."¹⁹⁰

¹⁸⁴ Ryckman, „Early Philosophical Interpretations of General Relativity”.

¹⁸⁵ Ryckman.

¹⁸⁶ Natorp, *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*, 403.

¹⁸⁷ Karl Bollert, *Einstein's Relativitätstheorie und ihre Stellung im System der Gesamterfahrung* (T. Steinkopf, 1921).

¹⁸⁸ Ernst Cassirer, *Zur Einstein'schen relativitätstheorie: Erkenntnistheoretische betrachtungen* (B. Cassirer, 1921), 1–125.

¹⁸⁹ Ryckman, „Early Philosophical Interpretations of General Relativity”.

¹⁹⁰ Cassirer, Swabey, și Swabey, *Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity*, 412.

E. Sellien¹⁹¹ a declarat că opiniile lui Kant despre spațiu și timp se referă numai la spațiul intuitiv, și deci au fost impermeabile la spațiul și timpul măsurabil ale teoriei empirice a lui Einstein.

Empirismul logic al filosofiei științei a apărut în cea mai mare parte ca urmare a celor două teorii ale relativității lui Einstein, favorizând convenționalismul à la Poincaré față de neo-kantianism și pozitivismul machian. Filosofia empirismului logic al științei în sine se consideră că a fost formată din învățăturile extrase din teoria relativității. Câteva dintre cele mai caracteristice doctrine ale acestei filosofii (interpretarea elementelor *a priori* în teoriile fizice ca niște convenții, tratarea rolului necesar al convențiilor în dezvoltarea conceptelor teoretice din observare, insistența asupra limbajului observațional în definirea termenilor teoretici) au fost folosite de Einstein în modelarea celor două teorii ale relativității.¹⁹²

Reichenbach a dezvoltat teza "relativității geometriei", că se poate dezvolta o geometrie arbitrară pentru spațiu-timp dacă legile fizicii sunt modificate corespunzător prin introducerea "forțelor universale". Dar prima lucrare a lui Reichenbach despre relativitate¹⁹³ a fost scrisă dintr-o perspectivă neo-kantiană. Conform lui Friedman¹⁹⁴ și Ryckman¹⁹⁵, Reichenbach, a modificat concepția kantiană a principiilor *a priori* sintetice, respingând sensul "valabil pentru toate timpurile", păstrând în același timp "constitutivul obiectului cunoașterii", rezultând o teorie specifică "*a priori* relativizată". Apare astfel o transformare în metoda cercetării epistemologice a științei prin care "metoda de analiză a științei" este propusă ca "singura modalitate care ne permite să înțelegem contribuția rațiunii noastre la cunoaștere."¹⁹⁶ Metodologia raționalizării implică distingerea în mod clar între rolul subiectiv al principiilor și contribuția realității obiective. Teoria relativității este un exemplu strălucitor al acestei metode deoarece a arătat că metrica spațiu-timpului

¹⁹¹ Ewald Sellien, *Die erkenntnistheoretische Bedeutung der Relativitätstheorie* (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1919).

¹⁹² Ryckman, „Early Philosophical Interpretations of General Relativity”.

¹⁹³ Hans Reichenbach, *Relativitätstheorie Und Erkenntnis Apriori* (J. Springer, 1920).

¹⁹⁴ Michael Friedman, „Geometry, Convention, and the Relativized A Priori: Reichenbach, Schlick, and Carnap”, *Reconsidering Logical Positivism*, iulie 1999, 21–34, <https://doi.org/10.1017/CBO9781139173193.006>.

¹⁹⁵ Thomas Ryckman, *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915-1925*, 1 edition (Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005).

¹⁹⁶ Reichenbach, *Relativitätstheorie Und Erkenntnis Apriori*, 74.

descrie o "proprietate obiectivă" a lumii, odată ce este recunoscută libertatea subiectivă de transformare a coordonatelor (principiul coordonator al covarianței generale).^{197 198}

Einstein, într-o prelegere din ianuarie 1921 intitulată "Geometrie și experiență" a susținut că întrebarea referitoare la natura geometriei spațiu-timp este o problemă empirică numai cu privire la anumite stipulări. Concepția convențională a lui Reichenbach a ajuns la maturitate în 1922. Reichenbach a susținut că problemele referitoare la determinarea empirică a metricii spațiu-timpului trebuie să țină cont de faptul că atât geometria cât și fizica admite testul observațional, acesta fiind cazul și în relativitatea generală a lui Einstein (metoda lui Reichenbach a fost numită "analiza logică a științei.") Astfel, determinarea empirică a metricii spațiu-timp prin măsurare necesită alegerea unor "indicatori metrici" prin stabilirea unei definiții coordinative. Einstein, împreună cu Schlick și Reichenbach, a dezvoltat o nouă formă de empirism, adecvat argumentării relativității generale împotriva criticii neo-kantiene.^{199 200}

Einstein a implementat o concepție relaționistă sau relativistă a mișcării, în conformitate cu atitudinea relaționistă a lui Leibniz față de spațiu și timp și în contrast cu atitudinea absolutistă a lui Newton. Prin aceasta se plasează constrângeri asupra ontologiei teoriilor spațio-temporale, limitând domeniul în care cuantificatorii teoriilor se situează la setul de evenimente fizice, adică în setul de puncte spațio-temporale care sunt de fapt ocupate de obiecte sau procese materiale.²⁰¹ Relaționismul reichenbachian, pe de altă parte, impune constrângeri asupra ideologiei teoriilor spațio-temporale, limitând vocabularul la un anumit set de predicate preferate, precum predicate definite în termeni de relații "cauzale".

Conventionalismul, ca și relaționalismul, este sceptic față de structurile postulate de teoriile spațio-temporale. El pune problema proprietăților și relațiilor geometrice (metrice) definite în acest domeniu. Friedman afirmă că convenționalismul este strâns legat de relaționalismul ideologic. Convenționalismul de bază susține că anumite sisteme de descriere incompatibile la prima vedere, precum geometriile euclidiană și non-euclidiană, sunt în realitate "descrieri echivalente" ale acelorași fapte, ambele putând fi adevărate în raport cu diferitele "definiții coordinative" alese în mod arbitrar. Aceasta reprezintă o problemă epistemologică în alegerea dintre teorii

¹⁹⁷ Reichenbach, 90.

¹⁹⁸ Ryckman, „Early Philosophical Interpretations of General Relativity”.

¹⁹⁹ Moritz Schlick, „Kritizistische Oder Empiristische Deutung der Neuen Physik?”, *Société Française de Philosophie, Bulletin* 26, nr. n/a (1921): 96.

²⁰⁰ Hans Reichenbach, *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*, 1 Plate (De Gruyter, 1928).

²⁰¹ Friedman, *Foundations of Space-Time Theories*.

concurente, rezultând o problemă a subdeterminării teoretice. Astfel, Friedman afirmă că teoria relativității pare să se bazeze pe o concepție a "descrierilor echivalente" derivată direct din strategia convenționalistă.²⁰² Dezvoltarea teoriei relativității se bazează pe o metodologie din perspectiva procesului de unificare teoretică.

La un deceniu după apariția teoriei generale a relativității, se vorbea despre o reducere a fizicii la geometrie,²⁰³ ducând la probleme filosofice distincte, de metodologie dar și de epistemologie și metafizică, împreună cu chestiunile tehnice. Această reducere implicită a fizicii la geometrie a fost obținută crucial în cadrul epistemologic a ceea ce Hilbert numea "metoda axiomatică."²⁰⁴

După finalizarea relativității generale, Einstein a încercat să dezvolte o teorie care unifică gravitația și electromagnetismul, prin generalizarea geometriei riemanniene sau adăugând dimensiuni suplimentare, dar excluzând reducerea fizicii la geometrie.²⁰⁵ Până în 1925 a inventat primele "teorii ale câmpului unificat" geometric.²⁰⁶ Niciunul dintre aceste eforturi nu a avut succes. În programul său de cercetare pentru unificarea geometrică, metodologia de cercetare a lui Einstein a suferit o schimbare dramatică,²⁰⁷ bazându-se din ce în ce mai mult pe "considerente de estetică matematică, simplitate logică, și inevitabilitatea anumitor structuri matematice sub diverse constrângeri, adoptate în mod esențial din motive filosofice."²⁰⁸

Matematicianul Hermann Weyl, în 1918, a încercat reconstituirea teoriei lui Einstein pe baza epistemologiei unei "geometrii infinitezimale pure."²⁰⁹

În decembrie 1921, Academia de la Berlin a publicat noua propunere a lui Theodore Kaluza privind unificarea gravitației și electromagnetismului pe baza unei geometrii riemanniene cinci-dimensionale.

²⁰² Friedman.

²⁰³ Oliver Lodge, „The Geometrisation of Physics, and Its Supposed Basis on the Michelson-Morley Experiment”, *News, Nature*, 1921, 795–802, <https://doi.org/10.1038/106795a0>.

²⁰⁴ K. A. Brading și T. A. Ryckman, „Hilbert’s ‘Foundations of Physics’: Gravitation and electromagnetism within the axiomatic method”, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39, nr. 1 (1 ianuarie 2008): 102–153, <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2007.08.002>.

²⁰⁵ Marco Giovanelli, „The Forgotten Tradition: How the Logical Empiricists Missed the Philosophical Significance of the Work of Riemann, Christoffel and Ricci”, *Erkenntnis* 78, nr. 6 (1 decembrie 2013): 1219–1257, <https://doi.org/10.1007/s10670-012-9407-2>.

²⁰⁶ Tilman Sauer, „Einstein’s Unified Field Theory Program”, *The Cambridge Companion to Einstein*, mai 2014, 281–305, <https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.011>.

²⁰⁷ Ryckman, *Einstein*, cap. 9, 10.

²⁰⁸ Ryckman, „Early Philosophical Interpretations of General Relativity”.

²⁰⁹ Hermann Weyl, Axel Hildebrand, și Dieter Schmalstieg, *Raum. Zeit. Materie: Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie*, 7. (Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo: Springer, 1988), 115–16.

Toate încercările de geometrizare a fizicii în programul de unificate acceptau abilitatea matematicii de a înțelege structura fundamentală a lumii exterioare. Astfel, programul câmpului unificat geometric pare a fi astfel încadrat într-o formă de realism științific denumit "realism structural", cu o nuanță platonistă. O formă a "realismului structural" presupune că indiferent de caracterul sau natura intrinsecă a lumii fizice, poate fi cunoscută doar structura sa. Această versiune a fost susținută de Russell, care a inclus teoria generală a relativității în acest cadru.²¹⁰

În forma sa contemporană, realismul structural are atât o formă epistemică, cât și una "ontică" conform căreia trăsăturile structurale ale lumii fizice sunt fundamentale ontologic.²¹¹ Thomas A. Ryckman afirmă că teoriile de unificare geometrică se potrivesc acestui tip de realism. Pentru Weyl și Eddington, "unificarea geometrică a fost o încercare de a armoniza teoria gravitației Einstein într-o nouă lumină epistemologică și explicativă, prin afișarea legilor câmpului de gravitație și electromagnetism în cadrul comun al unui observator reprezentat geometric - realitatea independentă."²¹²

Referitor la geometrizarea fizicii, a existat o controversă permanentă asupra convențiilor în știință,²¹³ și dacă alegerea unei geometrii este empirică, convențională sau a priori. Duhem²¹⁴ afirmă că ipotezele nu pot fi testate izolat, ci doar ca parte a teoriei ca un întreg (holismul teoretic și subdeterminarea alegerii teoriei prin dovezi empirice). Într-o adresă din 1918 către Max Planck, Einstein a afirmat despre subdeterminare:

"Sarcina supremă a fizicianului este ... căutarea celor mai generale legi elementare din care imaginea lumii trebuie obținută prin deducție pură. Nicio cale logică nu duce la aceste legi elementare; este doar intuiția care se bazează pe o înțelegere empatică a experienței. În această stare de incertitudine metodologică, se poate crede că sunt posibile în mod arbitrar multe, în sine, sisteme echivalente de principii teoretice; iar această opinie este, în principiu, cu siguranță corectă. Dar dezvoltarea fizicii a arătat că, din toate construcțiile teoretice imaginabile, una singură, în orice moment, s-a dovedit superioară necondiționat față de toate celelalte. Nimeni din cei care au aprofundat acest subiect nu va nega faptul că, în practică, lumea percepțiilor determină fără echivoc

²¹⁰ Bertrand Russell, *The Analysis of Matter*, First Paperback Edition edition (Nottingham: Spokesman Books, 2007), 395.

²¹¹ Pierre Maurice Marie Duhem, Jules Vuillemin, și Louis de Broglie, *The Aim and Structure of Physical Theory*, trad. Philip P. Wiener, 9932nd edition (Princeton: Princeton University Press, 1991).

²¹² Ryckman, „Early Philosophical Interpretations of General Relativity”.

²¹³ Paul Arthur Schilpp, ed., *Albert Einstein, Philosopher-Scientist: The Library of Living Philosophers Volume VII*, 3rd edition (La Salle, Ill.: Open Court, 1998).

²¹⁴ Duhem, Vuillemin, și Broglie, *The Aim and Structure of Physical Theory*.

sistemul teoretic, chiar dacă nicio cale logică nu conduce din percepții la principiile de bază ale teoriei.”²¹⁵

Einstein considera că realul fizic implică exclusiv ceea ce se poate construi pe baza coincidențelor spațio-temporale, punctele spațiu-timp fiind considerate ca intersecții ale liniilor de univers ("argumentul punct-coincidență").²¹⁶ Coincidențele au astfel un rol ontic privilegiat deoarece sunt invariabile și deci determinate în mod univoc.²¹⁷ Forța, în TGR, este de asemenea "geometrizată".²¹⁸ Metrica spațiu-timpului în TGR este reductibilă la comportamentul entităților materiale (ceasuri, raze luminoase, geodezice, etc.).²¹⁹ Rezultă că măsurarea depinde de instrumentele de măsurare alese ca standarde, iar relațiile metrice implică standardele alese.

Paul Feyerabend, îl consideră pe Einstein un metodolog "oportunist sau cinic" respectiv un metodolog anarhist.²²⁰ Arthur Fine afirmă că Einstein adoptă o viziune apropiată de atitudinea ontologică naturală.²²¹ van Frassen l-a considerat pe Einstein un empirist constructiv.²²² Nicholas Maxwell afirmă că empirismul orientat spre scop, ca o nouă metodă descoperirii, este viziunea matură a științei lui Einstein²²³ pentru a depăși o criză științifică severă: dispariția fizicii clasice ca urmare a teoriei cuantice a lui Planck din 1900. Empirismul orientat spre scop susține că știința face ipoteze permanente cu privire la natura universului, independent de considerentele empirice.

Atât Popper,²²⁴ cât și Kuhn²²⁵ și Lakatos²²⁶ apără versiuni ale empirismului standard în cazul lui Einstein.

Vincent Lam și Michael Esfeld susțin concepul unui realism structural ontic (RSO), în care "spațiu-timpul este o structură fizică formată din rețele de relații fizice

²¹⁵ Albert (Author) Einstein, „Motive des Forschens.”, 1918, 31, <http://alberteinstein.info/vufind1/Record/EAR000079148>.

²¹⁶ Don A. Howard, „Einstein's Philosophy of Science”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Fall 2017 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017), <https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/einstein-philsience/>.

²¹⁷ Nicolae Sfetcu, *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale* (MultiMedia Publishing, 2018), <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.17470.18242>.

²¹⁸ Adolf Grünbaum, *Philosophical Problems of Space and Time: Second, Enlarged Edition* (Springer Science & Business Media, 2012).

²¹⁹ Paul Feyerabend, *Against Method* (London: New Left Books, 1975).

²²⁰ Michael Esfeld și Vincent Lam, „Moderate Structural Realism About Space-Time”, *Synthese* 160, nr. 1 (2008): 18, 56–57, 213n.

²²¹ Arthur Fine, *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory* (University of Chicago Press, 1986), 9.

²²² Fine, 108.

²²³ Nicholas Maxwell, *Karl Popper, Science and Enlightenment* (London: UCL Press, 2017).

²²⁴ Karl Popper, *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*, 2nd edition (London ; New York: Routledge, 2002).

²²⁵ Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*.

²²⁶ Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*.

între obiectele fizice care nu posedă o identitate intrinsecă independent de relațiile în care se află,”²²⁷ care poate lua în considerare caracteristicile TGR fundamentale ale invarianței difeomorfismului²²⁸ și independenței de fond.²²⁹ Localizarea în cadrul RSO este dinamică și independentă de fundal, fiind difeomorfist invariantă, codificând astfel bine caracteristica TGR a independenței de fond.

Conform lui Don A. Howard, ”Filosofia lui Einstein este o sinteză originală a elementelor extrase din surse diverse, cum ar fi neo-kantianismul, convenționalismul și empirismul logic, caracteristica sa distinctivă fiind amestecul său românesc a realismului cu o formă holistică subdeterminată a convenționalismului.”²³⁰

Există câteva idei centrale pentru filosofia lui Einstein:

- Subdeterminarea opțiunii teoretice prin dovezi.
- Simplitatea și alegerea teoriei.
- Univocitate în reprezentarea teoretică a naturii.
- Realismul și separabilitatea.
- Distincția între teoriile principiilor și teoriile constructive.

Pentru Einstein, *simplitatea* este principalul criteriu în alegerea teoretică atunci când experimentele și observațiile nu dau indicii suficient de clare.²³¹ *Univocitatea* în reprezentarea teoretică a naturii nu trebuie să fie confundată cu o negare a tezei de *subdeterminare*. Principiul univocalității a jucat un rol central în formularea de către Einstein a relativității generale, inclusiv în elaborarea ”argumentului găurii” considerat eronat de unii fizicieni.²³²

Mulți filosofi și oameni de știință consideră că cea mai importantă contribuție a lui Einstein la filosofia științei a fost distincția pe care a făcut-o între teoriile principiilor și teoriile constructive. Conform lui Einstein, o **teorie constructivă** oferă un model constructiv pentru fenomenele de interes. O **teorie a principiilor** constă într-un set de generalizări empirice la nivel înalt individual bine confirmate.

²²⁷ Vincent Lam și Michael Esfeld, „The Structural Metaphysics of Quantum Theory and General Relativity”, *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 43, nr. 2 (2012): 243–258.

²²⁸ Difeomorfismul este o mapare bijectivă și netedă între varietăți diferențiate a căror inversare este de asemenea netedă.

²²⁹ Esfeld și Lam, „Moderate Structural Realism About Space-Time”.

²³⁰ Howard, „Einstein’s Philosophy of Science”.

²³¹ John Norton, *How Einstein Found His Field Equations: 1912-1915*, 1984, 21, 23.

²³² P. M. Harman și Peter Michael Harman, *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell* (Cambridge University Press, 2001).

Einstein afirmă că înțelegerea finală necesită o teorie constructivă, dar progresul în teorie poate fi ”împiedicat de încercările premature de a dezvolta teorii constructive în absența unor constrângeri suficiente prin care să se îngusteze o gamă de posibilități constructive.” Rolul teoriilor principiilor este de a oferi constrângeri, iar progresul este realizat pe baza unor astfel de principii. *Einstein afirmă că aceasta a fost metodologia sa în descoperirea teoriei relativității ca teorie principală, celelalte două principii fiind principiul relativității și principiul luminii.*

De remarcat similitudinea dintre ideea ”teoriilor principiilor” ca niște constrângeri ale lui Einstein, și ”nucleul dur” al lui Lakatos (euristica negativă) care ar fi constituit din suma ”teoriilor principiilor” ale lui Einstein.

Distincția dintre teoriile principiilor și teoriile constructive a jucat un rol explicit în gândirea lui Einstein. Harman a observat că versiuni primitive ale acestei distincții au fost folosite încă din secolul 19, de James Clerk Maxwell.²³³

Ecuatiile lui Einstein sunt dificil de rezolvat exact, dar există în prezent mai multe soluții exacte, precum soluția Schwarzschild, soluția Reissner-Nordström și metrica Kerr, fiecare corespunzând unui anumit tip de gaură neagră într-un univers altfel gol,²³⁴ și universurile Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker și de Sitter, fiecare descriind un cosmos în expansiune.²³⁵ Alte soluții exacte includ universul Gödel (cu posibilitatea de a călători în spațiu-timp), soluția Taub-NUT (un univers omogen dar anizotrop) și spațiul anti-de Sitter (cu conjectura Maldacena).²³⁶ Datorită dificultății acestor ecuații, în prezent se caută soluții prin integrarea numerică pe un calculator sau prin examinarea perturbărilor mici ale soluțiilor exacte. Din soluțiile aproximative găsite prin teoriile perturbării face parte și extinderea post-newtoniană, dezvoltată de Einstein, cu o distribuție a materiei care se mișcă lent în comparație cu viteza luminii. O particularizare a acestei extinderi este *formalismul post-newtonian parametrizat*, care permite comparații cantitative între predicțiile relativității generale și teoriile alternative.

Prin impunerea covarianței generale, toate verificările în spațiu-timp resupun o determinare a coincidențelor spațiu-timp.²³⁷ Schlick afirmă că pasajul din lucrarea lui

²³³ Subrahmanyan Chandrasekhar, *The Mathematical Theory of Black Holes* (Clarendon Press, 1998).

²³⁴ Jayant Vishnu Narlikar, *Introduction to Cosmology* (Jones and Bartlett, 1983).

²³⁵ Albert Einstein, *The Principle of Relativity* (S.I.: BN Publishing, 2008), 78.

²³⁶ Stephen W. Hawking et al., *The Large Scale Structure of Space-Time*, New Ed edition (Cambridge: Cambridge University Press, 1975).

²³⁷ A. Einstein, „The foundation of the general theory of relativity”, în *The Principle of Relativity. Dover Books on Physics. June 1, 1952. 240 pages. 0486600815, p. 109-164, 1952, 117, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1952prel.book..109E>.*

Einstein din 1916 care se referă la acest aspect reprezintă nașterea distincției moderne observație/teorie, și începutul interpretărilor empirice și veridice ale pozitivismului de mai târziu.²³⁸

Einstein a sperat ca relativitatea generală să extindă relativitatea mișcării de la echivalența galileeană la echivalența tuturor stărilor de mișcare, inclusiv rotația, bazându-se pe presupunerea că covarianța generală sau echivalența descrierilor coordonatelor garantează echivalența dorită. Dar prin ea însăși, covarianța generală nu este un astfel de argument, neputând rezolva problema originală a relației dintre mișcare a lui Einstein. Această problemă este, în esență, una de structură geometrică.²³⁹ Conform lui Disalle, Einstein a făcut o confuzie epistemologică acceptând ideea că mișcările relative pot fi cunoscute independent de orice teorie spațială, pentru a permite mișcărilor relative să aibă o poziție privilegiată epistemologic. Disalle ajunge la concluzia că relaționalismul clasic, considerat a fi o critică epistemologică a teoriei spațiu-timp, este el însuși o teorie spațială.

Riemann (1867) și Helmholtz (1870) au afirmat că toate măsurătorile geometrice depind de ipotezele fizice care stau la baza metodei de măsurare, pentru că o geometrie empirică trebuie să postuleze nu numai o structură geometrică, ci și o reprezentare a unui proces fizic idealizat.²⁴⁰ Pentru Riemann, legătura dintre geometrie și fizică va trebui să se bazeze pe obiecte fizice și procese mai complicate. O astfel de legătură implică un principiu fizic, idee preluată și de Einstein pentru curbura spațiu-timp.²⁴¹

Poincare afirma că orice măsurătoare poate fi de acord cu orice geometrie, dacă eliminăm discrepanțele prin ipoteza unei forțe distorsionante care afectează instrumentele de măsurare.²⁴² Reichenbach și Schlick au sistematizat acest concept prin noțiunea de "definiție coordonatorie", direcționând empirismul spre convenționalism, cu o geometrie cu definiții care corelează concepte fundamentale cu

²³⁸ Moritz Schlick, *Space and Time in Contemporary Physics: An Introduction to the Theory of Relativity and Gravitation* (Mineola, N.Y: Dover Publications, 2005).

²³⁹ Disalle, „Spacetime Theory as Physical Geometry”.

²⁴⁰ Bernhard Riemann și Hermann Weyl, *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1919), 133–52, <https://www.springer.com/gp/book/9783662423165>.

²⁴¹ Albert Einstein, *Geometrie und Erfahrung: Erweiterte Fassung des Festvortrages Gehalten an der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 27. Januar 1921* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1921), 123–30, <https://www.springer.com/de/book/9783642499036>.

²⁴² Henri Poincare, *The Foundations of Science; Science and Hypothesis, the Value of Science, Science and Method* (Place of publication not identified: TheClassics.us, 2013), 81–84.

un obiect dat empiric.²⁴³ ²⁴⁴ Astfel, Reichenbach a afirmat că: "semnificația filosofică a teoriei relativității constă... în faptul că a demonstrat necesitatea unor definiții coordonatorii metrice în mai multe locuri unde anterior s-au asumat relații empirice."²⁴⁵

Un exemplu în acest sens este simultaneitatea. Fizica newtoniană a considerat simultaneitatea evenimentelor ca fapt empiric, pe când Einstein a impus simultaneitatea ca un principiu fizic. Întrucât viteza luminii a fost considerată invariantă, a rezultat că simultaneitatea este relativă. Disalle afirmă că definiția lui Einstein pentru simultaneitate este circulară, întrucât presupune deja un principiu de măsurare a timpului. Einstein a negat, afirmând că definiția nu presupune nimic despre lumină, invarianța vitezei luminii nefiind o ipoteză, ci "o prevedere pe care o pot face în mod liber, pentru a obține o definiție a simultaneității."²⁴⁶ Disalle concludă că problema naturii spațiu-timpului nu este dacă o entitate teoretică oferă o explicație cauzală pentru aparențe, ci despre dacă procesele fizice de măsurare sunt conforme cu legile geometrice. În concluzie, Reichenbach neagă rolul geometriei în explicarea cauzei fundamentale a relațiilor spațiale.²⁴⁷

Dar Einstein leagă spațiu-timpul nu doar de o anumită procedură, ci de un sistem de legi naturale, legile electrodinamicii, pe care le consideră ca fiind invariante fundamentali. Astfel definirea coordonată a stărilor de mișcare este un proces mai subtil decât a propus Reichenbach, implicând nu alegerea unui cadru de repaus ci stabilirea legilor mișcării. Practic, legile mișcării au devenit astfel, prin definiții coordinative, postulate ale geometriei spațiu-timp.²⁴⁸

Conform lui Lakatos, teoria lui Einstein nu este mai bună decât cea a lui Newton din cauza refutării teoriei lui Newton: există "anomalii" și ale teoriei lui Einstein. Dar aceasta reprezintă un progres în comparație cu teoria lui Newton, pentru că a explicat tot ceea ce a explicat cu succes teoria lui Newton, și a explicat și anomaliiile acelei teorii. În plus, a prezis cu succes evenimente despre care teoria lui Newton nu a spus nimic.

2.1 Euristicele programului relativității generale

²⁴³ Hans Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time*, 1st edition (New York, NY: Dover Publications, 1957).

²⁴⁴ Moritz Schlick, *Allgemeine Erkenntnislehre: Abteilung I / Band 1*, ed. Hans Jürgen Wendel și Fynn Ole Engler, Abteilung I: Veröffentlichte Schriften (Wien: Springer-Verlag, 2009), <https://www.springer.com/gp/book/9783211327685>.

²⁴⁵ Reichenbach, *The Philosophy of Space and Time*, 15.

²⁴⁶ Einstein, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, 15.

²⁴⁷ Disalle, „Spacetime Theory as Physical Geometry”.

²⁴⁸ Disalle.

Principiul esențial de coordonare în TGR este principiul echivalenței, incluzând o euristică negativă. Argumentul "nu este acela că toate cadrele de referință sunt echivalente, ci că coordonarea clasică a mișcării uniforme în linie dreaptă cu căile particulelor fără forță aplicată nu poate fi realizată fără nicio ambiguitate sau inconsistență."²⁴⁹ Principiul echivalenței afirmă că descompunerea mișcării gravitaționale într-o mișcare uniformă și o accelerație gravitațională nu poate fi unică, deoarece căderea liberă nu se distinge la nivel local de mișcarea uniformă. Oricum, o astfel de descompunere implică o încălcare a covarianței generale, pentru că reprezintă o alegere arbitrară a unui sistem de coordonate.²⁵⁰ Pentru orice sistem de coordonate, dacă identificăm liniile sale cu liniile geodezice, putem construi câmpul gravitațional astfel încât să se poată diferenția între aceste geodezice și mișcările efective.²⁵¹

Teoria specială a relativității (TSR) a lui Einstein este construită pe două postulate fundamentale. postulatul luminii (viteza luminii, în "cadrul de repaus", este independentă de viteza sursei), și principiul relativității. Acesta din urmă a fost adoptat de Einstein în mod explicit ca mijloc de restrângere a formei legilor, oricare ar fi structura lor detaliată. Astfel, avem diferența între o teorie "constructivă" și una "principală" Teoria generală a relativității a fost dezvoltată folosind ca nucleu un principiu de simetrie: principiul covarianței generale.²⁵² Inițial, Einstein a văzut principiul covarianței generale ca o extensie a principiului relativității în mecanica clasică, și în TSR. Pentru Einstein, principiul covarianței generale a fost un postulat crucial în dezvoltarea TGR. Libertatea difeomorfismului TGR (invarianța formei legilor sub transformări ale coordonatelor depinzând de funcțiile arbitrare ale spațiului și timpului) este o simetrie spațio-temporală "locală", spre deosebire de simetriile spațio-temporale "globale" ale TSR (care depind în schimb de parametrii constanți).

În ultimii ani, au apărut numeroase dezbateri în fizică și filosofie referitor la anumite tipuri de simetrii care acționează în spațiul teoriilor. Asemenea simetrii sunt interpretate ca realizând o "echivalență" între două teorii despre care se spune că sunt legate de o "simetrie duală" (în cazul unei "simetrii" în sensul strict al unui

²⁴⁹ Disalle.

²⁵⁰ Einstein, „The foundation of the general theory of relativity”, 114.

²⁵¹ Einstein, 142–43.

²⁵² Katherine Brading, Elena Castellani, și Nicholas Teh, „Symmetry and Symmetry Breaking”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Winter 2017 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017), <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/symmetry-breaking/>.

automorfism, acestea se numesc "auto-dualități"). Katherine Brading²⁵³ exemplifică prin dualitățile dintre teoriile câmpului cuantic (cum ar fi dualitatea magnetică/electrică generalizată), între teoriile corzilor (cum ar fi dualitățile T și S) și între descrierile fizice care sunt, precum o teorie a câmpului cuantic și o teorie a corzilor, ca în cazul dualităților gauge/gravitație.²⁵⁴ Alte exemple sunt dualitatea poziție-impuls, dualitatea undă-particulă, sau și dualitatea Kramers-Wannier a modelului Ising bidimensional în fizica statistică. Dualitățile sunt transformări între teorii, în timp ce simetria este o mapare între soluțiile aceleiași teorii. O simetrie poate fi exactă (valabilitate necondiționată), aproximativă (valabilă în anumite condiții) sau ruptă (în funcție de obiectul luat în considerare și de contextul său). Simetriile au funcționat normativ, ca niște constrângeri, în covarianța generală a lui Einstein în stabilirea ecuațiilor relativității generale.

Elie Zahar a afirmat că dezvoltarea de către Einstein a relativității s-a datorat unor convingeri metafizice vagi ale acestuia, corepunzând unor "prescripții euristice" proprii care au devenit un instrument specific și puternic. Zahar declară că revoluția științifică a lui Kuhn nu se aplică în cazul lui Einstein. Conform lui, două "dispozitive euristice" au dus la descoperirea teoriei relativității: cerința internă de coerență, și susținerea că, "din moment ce Dumnezeu nu este înșelător, nu pot exista accidente în natură." Simetriile naturale sunt fundamentale la nivel ontologic, iar regula euristică are prioritate în fața unei teorii care nu explică simetriile ca manifestări mai profunde.²⁵⁵

Conform lui Newton, gravitația nu este o calitate primară la fel ca inerția sau impenetrabilitatea. De aceea, inerția și gravitația sunt proprietăți independente. Dar Newton afirmă că masa inertială este egală cu masa gravitațională, fără a explica motivul acestei identități (există o simetrie care contrazice independența celor două proprietăți). În cazul experienței lui Michelson, prin postularea eterului ca mediu universal rezultă că acesta este nedetectabil, ceea ce constituie un paradox. Einstein a devenit conștient de acest paradox. Einstein elimină asimetria dintre gravitație și inerție propunând ca toate câmpurile gravitaționale să fie inerțiale. El mai avea și alte obiecții față de fizica clasică: teoria electromagnetică a lui Lorentz se confrunta cu un

²⁵³ Katherine Brading și Harvey R. Brown, „Symmetries and Noether's Theorems”, în *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, ed. Katherine A. Brading și Elena Castellani (Cambridge University Press, 2003), 89–109.

²⁵⁴ Brading, Castellani, și Teh, „Symmetry and Symmetry Breaking”.

²⁵⁵ Zahar, „Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's?”

dualism între particule încărcate discrete guvernate de legile lui Newton și un câmp continuu care respecta ecuațiile lui Maxwell; relativitatea se aplica pentru Lorentz mecanicii, dar nu și electrodinamicii; ideea de spațiu absolut (există un cadru inerțial privilegiat), deși eliminarea lui nu influențează mecanica clasică.

Einstein a apreciat la principiul relativității universalitatea sa și rolul său unificator pentru mecanică și electrodinamică, acesta fiind primul principiu pe care și-a dezvoltat teoria generală a relativității. Al doilea principiu este cel al luminii dar, din punct de vedere epistemologic, al doilea punct de plecare al lui Einstein în dezvoltarea teoriei generale a relativității nu a fost principiul luminii, ci ideea că ecuațiile lui Maxwell sunt covariante și exprimă o lege a naturii. Principiul luminii rezultă din această idee, ca și principiul relativității, conform lui Zahar.²⁵⁶

Practic, Einstein avea de ales să dezvolte relativitatea generală pornind de la ecuațiile lui Maxwell sau de la legile lui Newton. Dar în dualismul dintre particule și câmpuri, toate încercările de explicare mecanică a comportamentului câmpului au eșuat.

Conform lui Zahar, niciun experiment "crucial" nu ar fi putut fi conceput între teoria lui Lorentz și cea a lui Einstein în 1905. Dar Minkowski și Planck abandonează programul clasic pentru relativitatea specială, contrar metodologiei lui Kuhn. Mai mult, Einstein era pe atunci un quasi-necunoscut, în timp ce Lorentz era o autoritate recunoscută. Iar teoria lui Lorentz a fost foarte clară față de cea a lui Einstein care a implicat o revizuire majoră a noțiunilor de spațiu și timp. De asemenea, nu au existat anomalii pe care teoria lui Einstein să le fi soluționat mai bine decât Lorentz. În plus, Lorentz însuși a fost în final convins de noua perspectivă.²⁵⁷ Whittaker²⁵⁸ consideră pe Lorentz și Poincaré drept adevărații autori ai relativității speciale, meritul lui Einstein fiind cel al dezvoltării relativității generale. Astfel programul eteric al lui Lorentz nu ar fi fost învins de programul relativității, ci practic a fost dezvoltat în el. Zahar îl contrazice, pe baza faptului că cele două programe posedă euristici foarte diferite.²⁵⁹

În cazul revoluției copernicane, programul platonice de modelare a fenomenului prin mișcări circulare și sferice a avut inițial succes, cu fiecare planetă pe o sferă cristalină fizică reală în rotație axială. Ulterior s-a descoperit că distanța dintre pământ și planete variază, astfel încât s-au făcut ipoteze suplimentare prin excentricități,

²⁵⁶ Zahar.

²⁵⁷ Zahar.

²⁵⁸ Edmund Taylor Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity* (Harper, 1960).

²⁵⁹ Zahar, „Why Did Einstein's Programme Supersede Lorentz's?”

epicicluri și ecrane, pentru a explica noile observații. Când s-a încercat să se determine mișcarea corpurilor cerești față de pământ datorită mișcărilor neuniforme au apărut diferențe între fenomene și metodele matematice care permiteau doar mișcări circulare cu pământul în centrul universului. Copernic, deși a considerat Soarele fix, nu a rezolvat această diferență, apelând în continuare la epicicluri. Kepler a fost cel care a desființat epiciclurile și a găsit legile mișcării eliptice a planetelor cu Soarele într-un focar. Lorentz s-a folosit de transformările galileene, eliminând epiciclurile dar conferind cadrului eteric un statut privilegiat. Tot așa cum Copernic a fost conștient de idealizarea modelului său planetar, Lorentz a înțeles ulterior că coordonatele efective, și nu cele galileene, sunt cantitățile măsurate în cadrul în mișcare. Einstein a renunțat la transformările galileene și a identificat coordonatele efective măsurate ca fiind singurele reale. Euristica lui Einstein se bazează pe o cerință generală a covarianței Lorentz pentru toate legile fizice, impunând renunțarea la transformările galileene.

Zahar afirmă că Lorentz și Einstein au apelat la euristici diferite în programele lor de cercetare.²⁶⁰ Programul eteric a fost înlocuit practic de un program cu putere euristică mai mare, acesta fiind motivul pentru care Planck a abandonat teoria lui Lorentz în favoarea lui Einstein chiar înainte ca programul lui Einstein să devină progresiv empiric. Cele două teorii sunt similare din punctul de vedere al "nucleului dur" (euristica negativă), putând fi considerate drept programe bifurcate. Diferența dintre euristicile pozitive a fost cea care a condus la alegerea de către oamenii de știință a programului lui Einstein la începutul secolului trecut. Euristica pozitivă a lui Lorentz a constat în dotarea eterului cu proprietăți care să explice multe fenomene fizice, inclusiv câmpul electromagnetic și mecanica newtoniană. Această abordare a permis o dezvoltare rapidă a programului lui Lorentz, dar spre sfârșitul secolului 19 euristica sa atinsese un punct de saturație. A apărut o serie de programe degenerare ca modele mecanice pentru a rezolva anomaliile eterului. Pentru a explica anumite fenomene electromagnetice, Lorentz a introdus postulatul eterului aflat în stare de repaus, dar calculele ulterioare au contrazis această ipoteză.

Diferențele din viziunile lui Lorentz și Einstein era una metafizică: Lorentz considera că universul respectă legile inteligibile (există un mediu de propagare, un absolut "acum", etc.), în timp ce pentru Einstein universul este guvernat de principii coerente matematic. (legi covariante, etc.) Zahar afirmă că toate revoluțiile științifice

²⁶⁰ Zahar.

majore au fost însoțite de o creștere a coerenței matematice însoțită de o pierdere (temporară) a inteligibilității (astronomia newtoniană este mai coerentă decât cea ptolemeică, dar acțiunea la distanță era neacceptată înainte de Newton, apoi acceptată la sfârșitul secolului 18 și din nou respinsă după Maxwell). În programul de cercetare al lui Lorentz, comportamentul câmpului electromagnetic ajunsese să dicteze proprietățile eterului, chiar improbabile (de exemplu, eter în repaus și care acționează prin forțe nete zero). Practic, strategia euristică a lui Lorentz s-a inversat: în loc deducă o teorie din eterul considerat fundamental, ajunge la eter pe baza câmpului. Euristica lui Einstein s-a bazat pe cerința ca toate legile fizice să fie Lorentz-covariante (să ia aceeași formă indiferent de cadrul de referință), și legea clasică să rezulte din noua lege ca un caz la limită.

Pentru a obține o teorie relativistă a gravitației, Einstein a păstrat principiul echivalenței, a decis să trateze toate sistemele de coordonate în mod egal și să impună o condiție a covarianței generale asupra tuturor legilor. Succesul empiric a relativității generale prin predicția corectă a comportamentului periheliului lui Mercur s-a dovedit crucial pentru dezvoltarea în continuare a programului.

Încă din 1905, programul relativității s-a dovedit a fi superior euristic față de cel clasic. Dar relativitatea specială nu a reușit să surclaseze empiric programul Lorentz. Experimentul lui Bucherer²⁶¹ a confirmat ambele ipoteze, iar experimentul lui Kaufmann²⁶² le-a negat pe amândouă. Înainte de apariția relativității generale, comunitatea științifică vorbea despre teoria lui Lorentz-Einstein considerându-le ca echivalente din punctul de vedere al unui observator. Relativitatea generală a reușit să înlocuiască empiric programul Lorentz explicând cu succes "precesia anormală" a periheliului lui Mercur. Această predicție a constituit un progres empiric. În plus, relativitatea generală s-a dovedit a fi mai falsifiabilă.

Nicholas Maxwell propune și el o metodă pentru unificarea a două teorii "care se contrazic reciproc."²⁶³ Modalitatea propusă de el pentru stabilirea teoriei unificate este următoarea: din cele două teorii, se aleg elementele comune care nu se contrazic, se înlătură elementele contradictorii, și pe această bază se dezvoltă noua teorie. El nu exemplifică suficient de clar, în opinia mea, care ar fi acele elemente comune în cazul

²⁶¹ A. H. Bucherer, „Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips”, *Annalen der Physik* 333 (1909): 513–36, <https://doi.org/10.1002/andp.19093330305>.

²⁶² W. Kaufmann, „Über die Konstitution des Elektrons”, *Annalen der Physik* 324 (1906): 949, <https://doi.org/10.1002/andp.19063240303>.

²⁶³ Maxwell, *Karl Popper, Science and Enlightenment*.

mecanicii clasicii și a electrodinamicii clasice, luate în considerare de toți oamenii de știință ca două teorii contradictorii din care s-a născut teoria specială a relativității. De asemenea, Nicholas Maxwell impune existența unei ”ipoteze cruciale”, a cărei falsificabilitate să permită acceptarea teoriei ca rezultând dintr-o metodă de descoperire având la bază empirismul orientat spre scop. În fizica zilelor noastre, sunt nenumărate exemple de teorii unificatoare (precum teoria M care propune unirea tuturor forțelor fundamentale, inclusiv gravitația) care nu și-au propus să devină falsificabile prin ”ipoteze cruciale”.

Relativitatea generală este rezultatul unificării, de către Einstein, a teoriei gravitației universale a lui Newton (cu acțiunea instantanee la distanță a gravitației) și teoriei speciale a relativității (cu limitarea oricărei viteze, la valoarea constantă a vitezei luminii, c). Aceste două principii se contrazic. Deci, conform lui Maxwell, ar trebui eliminate din viitoarea teorie unificatoare.

2.2 Proliferarea teoriilor post-einsteiniane

Imediat după elaborarea și succesul relativității generale, au început să apară teorii alternative pentru gravitație, care se pot încadra în patru mari categorii:²⁶⁴

- Teorii bifurcate (cu nucleul dur identic sau foarte asemănător cu cel al relativității generale), sau legate direct de relativitatea generală dar fără a fi bifurcate, precum teoriile bimetrice Cartan, Brans-Dicke și Rosen.
- Teorii unificatoare care încearcă să unifice mecanica cuantică cu relativitatea generală (teorii ale gravitației cuantice), precum gravitația cuantică în bucle.
- Teorii unificatoare care încearcă să unifice gravitația cu alte forțe, precum Kaluza-Klein.
- Teorii unificatoare care încearcă să unifice mai multe teorii simultan, precum teoria M.

În dezvoltarea acestor teorii s-au încercat multe strategii (euristici pozitive) diferite, prin adăugarea de noi ipoteze la TGR, utilizarea unui spațiu-timp pentru care universul este static, ipoteze care elimină singularitățile gravitaționale, etc. În competiția cu TGR, deocamdată a câștigat teoria lui Einstein, dovedind de departe o

²⁶⁴ Timothy Clifton et al., „Modified Gravity and Cosmology”, *Physics Reports* 513, nr. 1–3 (martie 2012): 1–189, <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001>.

putere euristică mult mai mare decât rivalii săi. Unele din aceste teorii au fost abandonate, altele sunt dezvoltate în continuare de diverse comunități de cercetători, încercând să elimine anomaliile găsite în TGR, sau să extindă TGR prin bifurcație sau ca teorii unificatoare.

După 1980, când comunitatea științifică a fost de acord că TGR este confirmată, au supraviețuit, în general, doar teoriile care includ TGR ca un caz particular. O atenție deosebită a început să se acorde teoriilor gravitației cuantice, în special teoria corzilor. Majoritatea teoriilor gravitației mai noi care nu sunt cuantice încearcă să rezolve diverse anomalii cosmologice, precum inflația cosmică, materia întunecată, energia întunecată, etc. Înmulțirea anomaliilor TGR din ultimul timp, inclusiv în cazul Pioneer, au dus la o revigorare a alternativelor la această teorie.

Majoritatea teoriilor din prima categorie listată mai sus includ o densitate lagrangiană, o "acțiune" (care garantează existența legilor de conservare, și a cărei componentă gravitațională este dedusă din densitatea lagrangiană prin integrare),²⁶⁵ și o metrică.

Teoriile metrice se pot clasifica în (de la cele mai simple la cele mai complexe):

- Teorii privind câmpurile scalare (includ teorii plan conforme și teorii stratificate cu felii de spațiu conforme)
- Teoriile quasiliniare
- Teorii tensoriale
- Teorii tensorial-scalare
- Teorii tensorial-vectoriale
- Teorii bimetriche
- Alte teorii metrice

Teoriile non-metriche mai importante includ

- Belinfante-Swihart
- Teoria Einstein-Cartan
- Kustaanheimo
- Teleparalelismul

²⁶⁵ Franz Mandl și Graham Shaw, *Lagrangian Field Theory, in Quantum Field Theory* (John Wiley & Sons, 2013), 25–38.

- Gravităția pe baza teoriei gauge

Câteva din aceste teorii se bazează pe principiul lui Mach (cadru de referință provine din distribuția materiei în univers,²⁶⁶ considerat a fi un intermediar între Newton (spațiu și timp absolut) și Einstein (nu există cadru de referință absolut). Dovezile experimentale arată că principiul lui Mach este greșit, dar teoriile aferente nu au fost în întregime excluse.

Pentru a verifica și clasifica toate aceste teorii s-au dezvoltat teste specifice, bazate pe auto-consistență (între teoriile non-metrice include eliminarea teoriilor care permit tahioni, poli fantomă și poli de ordine superioară, și pe cele care au probleme cu comportamentul la infinit), și pe completitudine (să permită analiza rezultatului fiecărui experiment de interes). De exemplu, orice teorie care nu poate prezice din primele principii mișcarea planetelor sau comportamentul ceasurilor atomice este considerată incompletă.

Trei teste sunt considerate "clasice" pentru capabilitatea teoriilor de gravitație de a gestiona efectele relativiste:

- deplasarea spre roșu gravitațională
- lentile gravitaționale (în jurul Soarelui)
- avansul anormal al periheliului planetelor.

La aceste teste s-a adăugat, în 1964, al patrulea test, numit întârzierea Shapiro. Fiecare teorie ar trebui să confirme aceste teste.

Principiul echivalenței lui Einstein (PEE), care se testează de asemenea pentru teoriile relativiste ale gravitației, are trei componente:

- *unicitatea căderii libere (principiul slabei echivalențe)*: masa inerțială este egală cu masa gravitațională;
- *invarianța Lorentz*: în absența efectelor gravitaționale, viteza luminii este constantă;
- *invarianța poziției locale*: rezultatul oricărui experiment non-gravitațional local este independent de locul și momentul în care este efectuat.

²⁶⁶ Alfred North Whitehead, *The Principle Of Relativity With Applications To Physical Science* (Whitefish, Mont.: Kessinger Publishing, LLC, 2008).

Conjectura lui Schiff afirmă că orice teorie completă, auto-consecventă a gravitației care verifică principiul slabei echivalențe, verifică în mod necesar și principiul echivalenței lui Einstein (dacă teoria are o conservare completă a energiei).

Teoriile metrice satisfac PEE. Doar unele teorii non-metriche satisfac PEE.

Principalele teorii post-relativitatea generală, non-cuantice, sunt teoria Brans–Dicke, A cincea forță, și Geometrodinamica.

Teoria Brans–Dicke este o teorie scalar-tensorială, în care interacțiunea gravitațională este mediată de un câmp scalar, și de câmpul tensorial al relativității generale.²⁶⁷ Teoria este considerată ca fiind în acord, în general, cu observațiile. Sursa câmpului gravitațional este, la fel ca în RG, tensorul stres-energie sau *tensorul de materie*. În teoria Brans-Dicke, în plus față de metricile care au un *câmp tensorial de rangul doi*, există un *câmp scalar* care schimbă *constanta gravitațională efectivă* în funcție de locație (aceasta este o caracteristică-cheie a teoriei, făcând parte din nucleul dur). Teoria Brans-Dick, față de RG, admite mai multe soluții. Ea prezice deflecția luminii și precesiunea periheliului planetelor, iar relativitatea generală se poate obține din teoria Brans-Dicke ca un caz particular, dar Faraoni susține că aceasta nu este valabilă în toate situațiile permise de teorie,²⁶⁸ iar unii fizicieni susțin că nu satisface principiul puternic de echivalență.

A cincea forță este o teorie care implică, pe lângă forțe gravitaționale, electromagnetice, nucleare puternice și nucleare slab, o a cincea forță pentru a explica diferite observații anormale care nu se potrivesc cu teoriile existente. O ipoteză a acestei teorii este că materia întunecată ar putea fi legată de o forță fundamentală necunoscută. Alții speculează că o formă de energie întunecată numită chintesență ar putea fi o forță a cincea.²⁶⁹ O astfel de forță fundamentală nouă, slabă, este dificil de testat. La sfârșitul anilor 1980, unii cercetători,²⁷⁰ au raportat că au descoperit această forță în timp ce reanalizau rezultatele lui Loránd Eötvös de la începutul secolului, dar alte experimente nu au reușit să reproducă acest rezultat. Unul din testele care pot fi întreprinse pentru a demonstra teoria se presupune că s-ar putea baza pe principiul puternic de echivalență (a cincea forță s-ar manifesta printr-un efect asupra orbitelor

²⁶⁷ C. Brans și R. H. Dicke, „Mach’s Principle and a Relativistic Theory of Gravitation”, *Physical Review* 124, nr. 3 (1 noiembrie 1961): 925–935, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925>.

²⁶⁸ Valerio Faraoni, „Illusions of general relativity in Brans-Dicke gravity”, *Physical Review D* 59, nr. 8 (22 martie 1999): 084021, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.59.084021>.

²⁶⁹ Cicoli, Pedro, și Tasinato, „Natural Quintessence in String Theory”, 44.

²⁷⁰ E. Fischbach et al., „Reanalysis of the Eotvos experiment”, *Physical Review Letters* 56 (1 ianuarie 1986): 3–6, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.3>.

sistemului solar, numit efectul Nordtvedt) cu Lunar Laser Ranging și interferometria de bază foarte lungă. Alte teste pot lua în considerare dimensiuni suplimentare;²⁷¹ mantia pământului ca detector de particule gigantice, concentrându-se pe geoelectroni;²⁷² rata de pulsație a stelelor variabile cefeide în 25 de galaxii;²⁷³ etc. În ultimii ani s-au propus diverse ipoteze suplimentare pentru consolidarea teoriei, dar niciun rezultat nu a fost concludent până în prezent.

Geometrodinamica este o încercare de a descrie spațiu-timpul și fenomene asociate în termeni de geometrie. Aceasta este o teorie unificatoare, încercând să unifice forțele fundamentale și să reformuleze relativitatea generală. Este o teorie inițiată de Einstein, dar încă activă. Într-un fel, termenul *geometrodinamică* este sinonim pentru relativitatea generală, caz în care este denumită mai exact ca *geometrodinamica lui Einstein* pentru a denota formularea inițială a valorii relativității generale. John Wheeler a promovat această teorie în anii 1960, încercând să reducă fizica la geometrie într-un mod fundamental, cu o geometrie dinamică cu o curbura variabilă în timp. Practic, Wheeler a încercat integrarea a trei concepte: masa fără masă, sarcina fără sarcină, și câmp fără câmp.²⁷⁴

2.3 Formalismul parametrizat post-newtonian (PPN)

În domeniul gravitației experimentale, una dintre aplicațiile importante este formalismul. Pentru evaluarea modelelor de gravitație, au fost propuse mai multe seturi de teste. *Formalismul post-newtonian* ia în considerare aproximări ale ecuațiilor de gravitație ale lui Einstein prin abaterile de ordinul cel mai scăzut de la legea lui Newton pentru câmpuri slabe. Pentru a crește precizia se pot adăuga termeni de ordin superior. La limită, expansiunea post-newtoniană se reduce la legea gravitației lui Newton. *Formalismul parametrizat post-newtonian* (PPN) detaliază parametrii care diferențiază teoriile gravitației, în câmpul gravitațional slab și viteze mult mai mici decât viteza luminii. PPN poate fi aplicat tuturor teoriilor metrice de

²⁷¹ A. J. Sanders et al., „Project SEE (Satellite Energy Exchange): Proposal for Space-Based Gravitational Measurements”, *Measurement Science and Technology* 10, nr. 6 (ianuarie 1999): 514–524, <https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/6/317>.

²⁷² Jacob Aron, „Earth’s Mantle Helps Hunt for Fifth Force of Nature”, *New Scientist*, 2013, <https://www.newscientist.com/article/dn23202-earths-mantle-helps-hunt-for-fifth-force-of-nature/>.

²⁷³ Bhuvnesh Jain, Vinu Vikram, și Jeremy Sakstein, „Astrophysical Tests of Modified Gravity: Constraints from Distance Indicators in the Nearby Universe”, *The Astrophysical Journal* 779, nr. 1 (25 noiembrie 2013): 39, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/39>.

²⁷⁴ John A. Wheeler, „On the nature of quantum geometrodynamics”, *Annals of Physics* 2, nr. 6 (1 decembrie 1957): 604–14, [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(57\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0003-4916(57)90050-7).

gravitație în care toate corpurile satisfac principiul Einstein de echivalență (PEE). Viteza luminii rămâne constantă în formalismul PPN și se presupune că tensorul metric este întotdeauna simetric. PPN este folosit pentru compararea și clasificarea teoriilor metrice alternative de gravitație. Cu ajutorul acestui formalism au fost eliminate multe teorii considerate anterior viabile.

În *notația beta-delta*, comportamentul câmpului slab gravitațional în relativitatea generală sunt caracterizate complet de zece parametri post-newtonieni. În notația lui Will,²⁷⁵ și Misner et al.²⁷⁶ ei au următoarele valori:

- γ : Cât de multă curbura a spațiului g_{ij} este produsă prin masa de repaus a unității
- β : Cât de multă neliniaritate există în legea superpoziției pentru gravitația g_{00}
- β_1 : Câtă gravitație este produsă de energia cinetică unitară $\rho_0 v^2/2$
- β_2 : Câtă gravitație este produsă de energia potențială gravitațională unitară ρ_0/U
- β_3 : Câtă gravitație este produsă de energia internă unitară $\rho_0 \Pi$
- β_4 : Câtă gravitație este produsă de unitatea de presiune p
- ζ : Diferența dintre energia cinetică radială și transversală asupra gravitației
- η : Diferența dintre solicitările radiale și transversale asupra gravitației
- Δ_1 : Câtă glisare a cadrelor inerțiale g_{0j} este produsă de impulsul unitar $\rho_0 v$?
- Δ_2 : Diferența dintre impulsul radial și transversal în tragerea cadrelor inerțiale

Aici, $g_{\mu\nu}$ este tensorul metric simetric 4×4 cu indicii μ și ν luând valori între 0 și 3. Un indice 0 va indica direcția timpului iar indicii i și j cu valori de la 1 la 3 vor indica direcțiile spațiale. În relativitatea generală, valorile acestor parametri sunt aleși astfel încât în limita vitezelor și a masei mici să coincidă cu legea gravitației lui Newton, să se asigure conservarea energiei, masei, impulsului și momentului unghiular; și pentru a asigura independența ecuațiilor de cadrul de referință.

Pentru relativitatea generală, $\gamma = \beta = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \Delta_1 = \Delta_2 = 1$ și $\zeta = \eta = 0$.

²⁷⁵ C. M. Will, „Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. II. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect.”, *Astrophys. J.* 163: 611-28(1 Feb 1971), 1 ianuarie 1971, 163, 611–28, <https://doi.org/10.1086/150804>.

²⁷⁶ Misner, Thorne, și Wheeler, *Gravitation*.

În notația *alpha-zeta* mai recentă a lui Will & Nordtvedt²⁷⁷ și Will²⁷⁸ se utilizează un set diferit de zece parametri PPN.

- $\gamma = \gamma$
- $\beta = \beta$
- $\alpha_1 = 7\Delta_1 + \Delta_2 - 4\gamma - 4$
- $\alpha_2 = \Delta_2 + \zeta - 1$
- $\alpha_3 = 4\beta_1 - 2\gamma - 2 - \zeta$
- $\zeta_1 = \zeta$
- $\zeta_2 = 2\beta + 2\beta_2 - 3\gamma - 1$
- $\zeta_3 = \beta_3 - 1$
- $\zeta_4 = \beta_4 - \gamma$
- ξ se calculează din $3\eta = 12\beta - 3\gamma - 9 + 10\xi - 3\alpha_1 + 2\alpha_2 - 2\zeta_1 - \zeta_2$

α_1 , α_2 și α_3 măsoară amploarea efectelor de cadru preferate. ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 , ζ_4 și α_3 măsoară abaterea de la conservarea energiei, a impulsului și a momentului unghiular.

În această notație, relativitatea generală are parametrii PPN $\gamma = \beta = 1$ și $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \zeta_1 = \zeta_2 = \zeta_3 = \zeta_4 = \xi = 0$

Există o relație matematică între metrică, potențialul metric, și parametrii PPN pentru această notație, cu zece potențiale metriche (câte unul pentru fiecare parametru PPN) pentru a asigura o soluție unică. Metodologia de aplicare a formalismului PPN la teoriile alternative de gravitație este un proces în nouă etape.²⁷⁹ Limitele parametrilor PPN²⁸⁰ sunt determinate din teste experimentale, astfel:

Parametru	Limita	Efect	Experiment
$\gamma - 1$	$2,3 \times 10^{-5}$	Întârziere de timp, Deflectarea luminii	Monitorizarea Cassini
$\beta - 1$	3×10^{-3}	Schimbarea periheliului	Schimbarea periheliului
$\beta - 1$	$2,3 \times 10^{-4}$	Efectul Nordtvedt cu ipoteza $\eta_N = 4\beta - \gamma - 3$	Efectul Nordtvedt

²⁷⁷ Kenneth Nordtvedt Jr. și Clifford M. Will, „Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity”, *The Astrophysical Journal* 177 (1 noiembrie 1972): 177, 757, <https://doi.org/10.1086/151755>.

²⁷⁸ Clifford M. Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”, *Living Reviews in Relativity* 17, nr. 1 (decembrie 2014): 4, <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.

²⁷⁹ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

²⁸⁰ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

	0,001	Mareea Pământului	Date gravimetrice
α_1	10 - 4	Polarizarea orbitelor	Reflector lunar
α_2	4 x 10 - 7	Precesia de spin	Aliniamentul axei solare cu ecliptica
α_3	4 x 10 - 20	Auto-accelerare	Statistici pulsar spin down
η_N	9 x 10 - 4	Efectul Nordtvedt	Reflector lunar
1	0,02	-	Legaturile PPN combinate
2	10 - 8	Accelerația pulsarilor binari	PSR 1913 + 16
3	10 - 8	Legea a treia a lui Newton	Accelerație lunară
4	0,006 (*)	-	Experimentul Kreuzer

(*) Pe baza lui $6\zeta_4 = 3\alpha_3 + 2\zeta_1 - 3\zeta_3$ din Will (q201). Este teoretic posibil ca un model alternativ de gravitație să ocolească această legătură, caz în care legătura este $|\zeta_4| < 0,4$.

Tabelul 2.1 Limitele parametrilor PPN²⁸¹ determinate din teste experimentale. Sursa: C. M. Will²⁸²

Singurul câmp gravitațional care intră în ecuațiile de mișcare este metrica g. Alte câmpuri vor contribui doar la generarea curburii spațiu-timp asociate metricii. Materia poate crea aceste câmpuri, și ele plus materia pot genera metrica, dar nu pot reacționa direct asupra materiei. Materia răspunde numai la metrică.²⁸³ Rezultă că metrica și ecuațiile de mișcare pentru materie sunt entități primare pentru calcularea efectelor observabile, și singura distincție între două teorii metrice este modul particular în care materia și eventual alte câmpuri gravitaționale generează metrica.

La limita post-newtoniană (mișcarea lentă, câmp slab), compararea unei teorii cu experimentele și a teoriilor gravitaționale între ele este suficient de precisă pentru majoritatea testelor, în special cele care implică sistemul solar. Diferențele apar în valorile numerice ale coeficienților din fața potențialului metric (parametri în formalismul PPN).

Parametrii γ și β sunt utilizați pentru a descrie testele "clasice" ale RG și sunt cei mai importanți, singurii parametri non-zero în RG și gravitația scalară-tensor. Parametrul ξ este non-zero în orice teorie a gravitației care prezice efectele localizării preferate; α_1 , α_2 , α_3 măsoară dacă teoria prezice sau nu efecte ale cadrului preferat

²⁸¹ Will.

²⁸² Clifford M. Will, „Is momentum conserved? A test in the binary system PSR 1913 + 16”, *The Astrophysical Journal Letters* 393 (1 iulie 1992): L59–61, <https://doi.org/10.1086/186451>.

²⁸³ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

post-newtonian; α_3 , ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 , ζ_4 măsoară dacă teoria prezice sau nu încălcarea legilor globale de conservare pentru impulsul total.

Carlton Morris Caves a ajuns la concluzia că experimentele de laborator pentru cercetarea caracteristicilor neliniare ale câmpului gravitațional, ca și măsurătorile de laborator ale gravitației produse de energia internă, sunt dificile și neconcludente.²⁸⁴ Cele mai accesibile experimente de laborator din punctul de vedere ale efectelor post-newtoniene sunt efectele de cadru preferat și de orientare preferată (pot fi modulate prin rotirea întregului aparat de laborator în raport cu spațiul inerțial) și efectele gravitaționale de tip magnetic (efectele asociate cu componentele metricei g : glisarea cadrelor inerțiale prin corpuri rotative, precesia giroscopică Lens-Thirring, accelerațiile gravitaționale produse de interacțiunile spin-spin ale corpurilor rotative și accelerațiile gravitaționale datorate cuplării pe orbită de spin). Efectele de tip magnetic sunt mult mai sensibile la direcția de rotație sau la mișcarea unei surse sau a unui detector de laborator față de alte experimente de laborator. Ca sursă se poate folosi un corp cu rotație rapidă, simetric axial și se poate modula încet viteza sa unghiulară.²⁸⁵

2.4 Teste ale relativității generale și ale teoriilor post-einsteinene

Clifford M. Will descrie, în *Theory and Experiment in Gravitational Physics*,²⁸⁶ apariția unei noi ere pentru relativitatea generală, de testare și verificare la niveluri de precizie foarte ridicate.

În 1959, oamenii de știință de la Lincoln Laboratories din Massachusetts au bombardat planeta Venus cu impulsuri de unde radio transmise de pe Pământ, sperând să detecteze ecoul undelor reflectate. Nu au detectat niciun ecou. La o analiză ulterioară au sesizat un ecou pe 14 septembrie, acesta fiind primul ecou radar înregistrat de pe o planetă.

În 1960, astronomii Thomas Matthews și Allan Sandage și colegii de la Mount Palomar au folosit un telescop pentru a înregistra o placă fotografică câmpului stelar din jurul sursei radio 3C48. Se așteptau să găsească un grup de galaxii, dar la locația exactă a sursei radio a fost observat un obiect ca o stea dar cu un spectru neobișnuit și

²⁸⁴ Caves, „Theoretical investigations of experimental gravitation”.

²⁸⁵ Caves.

²⁸⁶ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

o luminozitate variabilă cu frecvența de 15 minute.²⁸⁷ Acesta a fost primul quasar observat.²⁸⁸

Experimentul Pound-Rebka (1960), a verificat principiului echivalenței și deplasarea spre roșu gravitațională, și a demonstrat utilitatea tehnologiei cuantice (ceasuri atomice, măsurători cu laser, gravimetre supraconductoare, detectoare cu unde gravitaționale) în experimentele gravitaționale de înaltă precizie.²⁸⁹

Radiațiile înregistrate de la Venus au făcut din sistemul solar un laborator pentru testarea gravitației relativiste.²⁹⁰ Programul spațial interplanetar dezvoltat la începutul anilor 1960, și descoperirea în 1964 a efectului relativist de întârziere,²⁹¹ au oferit teste noi și exacte ale relativității generale. Până în 1974, sistemul solar a fost singura modalitate pentru teste de înaltă precizie a relativității generale.

În dezvoltarea relativității generale, Einstein a fost condus de criterii teoretice de eleganță și simplitate. Teoria sa s-a confruntat inițial cu "trei teste clasice": deplasarea anormală a periheliului lui Mercur, deflecția luminii de către Soare, și deplasarea spre roșu gravitațională a luminii.

Pe la sfârșitul anilor 1950 s-a sugerat că deplasarea spre roșu gravitațională a luminii nu este, totuși, un test real al relativității generale, fiind o consecință pură a principiului echivalenței și nu testa ecuațiile de câmp ale teoriei gravitaționale. Schiff a sugerat că experimentul Eotvos este de mai mare precizie decât deplasarea spre roșu gravitațională a luminii, pe care a înlocuit-o ca importanță, experimentul Eotvos verificând în ce măsură corpurile de compoziție diferită au aceeași accelerație.²⁹²

Ulterior au fost propuse alte teste pentru relativitatea generală, precum efectul Lense-Thirring, perturbarea orbitală datorată rotației unui corp, și efectul de Sitter, o

²⁸⁷ Thomas A. Matthews și Allan R. Sandage, „Optical Identification of 3C 48, 3C 196, and 3C 286 with Stellar Objects.”, *The Astrophysical Journal* 138 (1 iulie 1963): 30–56, <https://doi.org/10.1086/147615>.

²⁸⁸ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

²⁸⁹ R. V. Pound și G. A. Rebka, „Apparent Weight of Photons”, *Physical Review Letters* 4, nr. 7 (1 aprilie 1960): 337–41, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.337>.

²⁹⁰ W. B. Smith, „Radar observations of Venus, 1961 and 1959”, *The Astronomical Journal* 68 (1 februarie 1963): 15–21, <https://doi.org/10.1086/108904>.

²⁹¹ Irwin I. Shapiro, „Fourth Test of General Relativity”, *Physical Review Letters* 13, nr. 26 (28 decembrie 1964): 789–91, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>.

²⁹² L. I. Schiff, „On Experimental Tests of the General Theory of Relativity”, *American Journal of Physics* 28, nr. 4 (1 aprilie 1960): 340–43, <https://doi.org/10.1119/1.1935800>.

mișcare seculară a perigeului și a nodului orbitei lunii,²⁹³ ²⁹⁴ însă perspectivele de a le detecta erau încă slabe.²⁹⁵

Altă zonă de testare prin observare a relativității generale a fost cosmologia, prin predicția privind explozia primordială numită "Big Bang" și expansiunea ulterioară a Univesului, dar până la sfârșitul anilor 1950 observațiile cosmologice nu puteau distinge între diferitele teorii ale gravitației.²⁹⁶

Între timp a apărut o "proliferare" de teorii alternative de gravitație concurente ale relativității generale. În 1960 existau cel puțin 25 de astfel de teorii alternative.²⁹⁷

Conform lui Will, până în 1960 relativitatea generală era susținută empiric de un test de precizie moderată (schimbarea periheliului, aproximativ 1%), un test de precizie scăzută (deformarea luminii, aproximativ 50 %), un test neconcludent (deplasarea gravitațională spre roșu) și observațiile cosmologice care nu puteau distinge între diverse teorii. Aceasta a fost ceea ce Lakatos a denumit "perioada staționară". Din cauza confirmărilor sale experimentale limitate, relativitatea generală a fost chiar înlăturată din fizica de bază.²⁹⁸

Perioada dintre 1960 și 1980 a fost perioada de maturitate a relativității generale: s-au dezvoltat noi metode de testare de mare precizie care au inclus teste noi, precum precesiunea giroscopică, întârzierea luminii și "efectul Nordtvedt" în mișcarea lunară, utilizând inclusiv observații astrofizice și sateliți artificiali.

Datorită proliferării teoriilor alternative, era nevoie de un cadru teoretic cât mai bun pentru compararea verificărilor diferitelor experimente, pentru a clasifica teoriile și pentru a compara predicțiile lor cu rezultatele experimentărilor într-un mod sistematic.

Anul Rezultate experimentale sau observaționale

Rezultate teoretice

1960

Anizotropia Hughes-Drever a masei

Lucrările lui Penrose despre spinori

²⁹³ Josef Lense și Hans Thirring, „Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie”, *Physikalische Zeitschrift* 19 (1918): 156–63, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1918PhyZ...19..156L>.

²⁹⁴ W. de Sitter, „On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77 (1 decembrie 1916): 77, 155–84, <https://doi.org/10.1093/mnras/77.2.155>.

²⁹⁵ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

²⁹⁶ Whitrow și Morduch, „Relativistic theories of gravitation”, cap. 14.

²⁹⁷ C. DeWitt, *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*, Second Printing edition (Gordon & Breach, 1965), 165–313.

²⁹⁸ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

	Experimentul Pound-Rebka a deplasării gravitaționale spre roșu	Precesiunea giroscopică (Schiff) Teoria Brans-Dicke
1962	Descoperirea surselor de radiații X non-solare Descoperirea deplasării spre roșu a quasarilor	Formula Bondi pentru pierderea de masă Descoperirea metricii Kerr
1964	Experimentul Eotvos, Princeton Experimentul Pound-Snider a deplasării gravitaționale spre roșu	Întârzierea în timp a luminii (Shapiro) Teoremele singularităților în relativitatea generală
	Descoperirea fondului de microunde 3K	
1966	Detectarea aplatizării solare	Producerea de elemente în Big Bang
	Descoperirea pulsarilor	
1968	Măsurători cu radar planetare pentru întârzierea timpului	Efectul Nordtvedt și cadrul PPN timpuriu
	Lansarea lui <i>Mariners 6</i> și <i>7</i> Acquisition of lunar laser echo First radio deflection measurements	
1970	CygX1: a black hole candidate	Efecte de cadru referat
	<i>Mariners 6</i> and <i>7</i> time-delay measurements	Cadrul PPN rafinat Creșterea ariei găurilor negre în relativitatea generală
1972	Experimentul Eotvos, Moscova	
1974	Descoperirea pulsarilor binari	Evaporarea cuantică a găurilor negre
		Radiația gravitațională dipolară în teorii alternative
1976	Experimente de deplasare gravitațională spre roșu cu rachete	
	Testul lunar al efectului Nordtvedt Rezultate ale întârzierii timpului obținute cu <i>Mariner 9</i> și <i>Viking</i>	
1978	Măsurători ale scăderii perioadei orbitale ale pulsarului binar SS 433	
1980	Descoperirea lentilelor gravitaționale	

Tabelul 2.2 O cronologie a testelor pentru verificarea teoriei relativității generale în perioada 1960-80. Sursa: Clifford M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*²⁹⁹

Robert Dicke a efectuat mai multe experimente de năltă precizie pentru confirmarea teoriilor gravitației.³⁰⁰ Dicke ajunge la concluzia că experimentele gravitaționale pot fi împărțite în două clase

1. una care testează bazele teoriei gravitației (de ex., principiul echivalenței): experimentul Eotvôs, experimentul Hughes-Drever, experimentul de deplasare gravitațională spre roșu, etc.), verificând că gravitația este un fenomen de spațiu-timp curbat (descriș printr-o "teorie metrică" a gravitației). Relativitatea generală și teoria lui Brans-Dick sunt exemple de teorii metrice ale gravitației.
2. a doua clasă care testează teoriile metrice ale gravitației: formalismul parametrizat post-newtonian, sau PPN, inițiat de Kenneth Nordtvedt, Jr.,³⁰¹ și extins și îmbunătățit de Will.³⁰² PPN ia în considerație viteze mici și câmpuri slabe (limita post-newtoniană) a teoriilor metrice, pe baza unui set de 10 parametri reali. PPN s-a folosit pentru analiza experimentelor gravitaționale ale sistemului solar, pentru descoperirea și analiza de noi teste ale teoriei gravitației, precum efectul Nordtvedt, efectele de cadru preferate și efectele localizării preferate și pentru a analiza și clasificare teoriile metrice alternative de gravitație ajungând să fie instrumentul teoretic standard pentru aceste experimente, căutări și studii.

Pe la mijlocul anilor 1970, multe teorii alternative de gravitație erau onfirmate de experimentele la nivelul sistemului solar, dar nu și la nivel cosmologic. În 1974, Joseph Taylor și Russell Hulse au descoperit pulsarul binar,³⁰³ ale cărui pulsații extrem de stabile au fost monitorizate radiotelescopice, permițând măsurarea precisă a parametrilor astrofizici. În 1978 a fost măsurată rata de schimbare a perioadei orbitale

²⁹⁹ Will.

³⁰⁰ DeWitt, *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*, 165–313.

³⁰¹ Kenneth Nordtvedt, „Equivalence Principle for Massive Bodies. II. Theory”, *Physical Review* 169, nr. 5 (25 mai 1968): 1017–25, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.169.1017>.

³⁰² Will, „Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. II. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect.”, 163, 611–28.

³⁰³ R. A. Hulse și J. H. Taylor, „Discovery of a pulsar in a binary system”, *The Astrophysical Journal Letters* 195 (1 ianuarie 1975): L51-53, <https://doi.org/10.1086/181708>.

a sistemului, care a fost confirmată de relativitatea generală dar nu și de cele mai multe teorii alternative.

În **experimentul Michelson-Morley**, Michelson a pornit de la un experiment pentru a testa teoriile contradictorii ale lui Fresnel și Stokes despre influența eterului.³⁰⁴ ³⁰⁵ Stokes credea inițial că cele două teorii sunt echivalente observațional, ambele teorii explicând aberația luminii. Michelson a susținut că experimentul său din 1881 a fost un experiment crucial care a demonstrat teoria lui Stokes. Lorentz a arătat că Michelson "a interpretat greșit" faptele, și calculele lui Michelson au fost greșite. Michelson, împreună cu Morley, au decis să repete experimentul "la intervale de trei luni și astfel să evite orice incertitudine,"³⁰⁶ concluzia lor fiind de respingere a explicației lui Fresnel. Lorentz a pus la îndoială și noul experiment: "semnificația experimentului Michelson-Morley constă mai degrabă în faptul că ne poate învăța ceva despre schimbările în dimensiuni." În 1897 Michelson a făcut un nou experiment, concluzionând că rezultatul experimentului a fost unul "improbabil" și a decis că în 1887 a greșit: teoria lui Stokes trebuia respinsă, și cea a lui Fresnel trebuia să fie acceptată.

Fitzgerald, independent de Lorentz, a produs o versiune testabilă care a fost respinsă de experimentele lui Trouton, Rayleigh și Brace întrucât era progresivă teoretic, dar nu empiric, teoria lui Fitzgerald fiind considerată *ad-hoc* (că nu există "nici o dovadă independentă" [pozitivă] pentru ea).³⁰⁷ Einstein, ignorând aceste experimente, dar stimulat de criticile lui Mach de mecanică newtoniană, a ajuns la un nou program de căutare progresivă,³⁰⁸ care "a prezis" și a explicat rezultatul experimentului Michelson-Morley, dar a prezis și o gamă imensă de fapte nedescoperite anterior, care au obținut coroborări dramatice. Astfel, după numai douăzeci și cinci de ani mai târziu, experimentul Michelson-Morley a ajuns să fie văzut ca experiment crucial, considerat ca fiind "cel mai mare experiment negativ din istoria științei,"³⁰⁹ ³¹⁰ demonstrând toleranța metodologică susținută de Lakatos.

³⁰⁴ A Fresnel, „Lettre a Francois Arago sur L’Influence du Mouvement Terrestre dans quelques Phenomenes Optiques, in Annales de chimie et de physique - 98 Years available - Gallica”, 1818, <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343780820/date.r=Annales+de+chimie+et+de+physique.langEN>.

³⁰⁵ George Gabriel Stokes, *On Fresnel’s Theory of the Aberration of Light* (London, 1846), 76–81.

³⁰⁶ Lorentz, „Considerations on Gravitation”.

³⁰⁷ Joseph Larmor, *On the ascertained Absence of Effects of Motion through the Aether, in relation to the Constitution of Matter, and on the FitzGerald-Lorentz Hypothesis*, 1904, 624.

³⁰⁸ Karl Raimund Popper, *The Logic of Scientific Discovery* (Psychology Press, 2002).

³⁰⁹ J. D. Bernal, *Science in History* J. D. Bernal, 3rd edition (M.I.T Press, 1965).

³¹⁰ Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*.

În acest context, un semnal tipic al degenerării unui program este proliferarea "faptelor" contradictorii. Folosind o teorie falsă ca o teorie interpretativă, se poate obține - fără a comite o "greșeală experimentală" - propuneri contradictorii faptice, rezultate experimentale inconsecvente.³¹¹ Michelson însuși a fost frustrat de inconsecvența "faptelor" rezultate din măsurătorile sale.

Carlton Morris Caves propune șase posibile experimente de laborator pentru gravitația non-newtoniană: trei folosesc o balanță de torsiune ca detector, și alte trei folosesc un cristal dielectric de înaltă sensibilitate.³¹² Ideea lui Caves este de a demonstra că tehnologia va face în curând posibilă o nouă clasă de experimente, exclusiv de laborator. Concluzia lui Caves este că niciunul dintre aceste experimente nu ar fi ușor de realizat, cauza fiind limitele tehnologiei actuale. Dar majoritatea sunt fezabile în viitorul apropiat.

Efectele puternice ale gravitației sunt observate astrofizic (pitice albe, stele neutronice, găuri negre), caz în care se folosesc, ca teste experimentale, stabilitatea piticelor albe, rata spin-down a pulsarilor, orbitele pulsarilor binari, existența unui orizont al găurii negre, etc.

Recent au fost dezvoltate o serie de teste cosmologice pentru teoriile legate de materia întunecată, folosindu-se pentru constrângeri rotația galaxiei, relația Tully-Fisher, viteza de rotație a galaxiilor pitice, și lentilele gravitaționale.

Pentru teoriile legate de inflația cosmică, cel mai strict test este prin măsurarea dimensiunii undelor în spectrul radiației cosmice de fundal cu microunde.³¹³

Pentru teoriile legate de energia întunecată, pot fi folosite ca teste rezultatele strălucirii supernovei și vârsta universului.

Există diferențe mari de predicții între relativitatea generală și fizica clasică, precum dilatarea timpului gravitațional, lentila gravitațională, deplasarea spre roșu gravitațională a luminii, etc. Și există multe teorii relativiste ale gravitației, bifurcate sau independente, dar teoria generală a relativității lui Einstein a confirmat toate predicțiile și este cea mai simplă dintre astfel de teorii.

³¹¹ Lakatos.

³¹² Caves, „Theoretical investigations of experimental gravitation”.

³¹³ Funcția potențial, care este crucială pentru determinarea dinamicii inflației, este pur și simplu postulată, și nu derivată dintr-o teorie fizică subiacentă.

2.4.1 Teste propuse de Einstein

Einstein afirmă, în *Teoria relativității - Relativitatea specială și relativitatea generală*,³¹⁴ că teoriile evoluează prin decalarații bazate pe observații, sub forma unor legi empirice, din care se obțin legile generale. Un rol important îl joacă intuiția și gândirea deductivă în acest proces. După stadiul inițial, investigatorul dezvoltă un sistem de gândire ghidat de date empirice, construit logic din ipoteze fundamentale (axiomele). "Adevărul" unei teorii rezultă din corelarea ei cu un număr mare de observații unice. Pentru aceleași date empirice pot exista mai multe teorii care diferă între ele.

Einstein vorbește, în *Teoria relativității- Relativitatea specială și relativitatea generală*, de predicția confirmată a relativității generale pentru mișcarea *periheliului lui Mercur*, cu o precizie mult mai mare decât cea prezisă de legea gravitației universale a lui Newton.³¹⁵

O altă predicție confirmată discutată de Einstein este *devierea luminii* de un câmp gravitațional, care admite un test experimental prin intermediul înregistrării fotografice a stelelor în timpul unei eclipse totale a soarelui, astfel: stelele din vecinătatea soarelui sunt fotografiate în timpul unei eclipse solare. A doua fotografie a acelorași stele este făcută când soarele este situat într-o altă poziție pe cer, cu câteva luni mai devreme sau mai târziu. Prin comparația pozițiilor stelelor, acestea ar trebui să apară deplasate radial spre exterior. Societatea Regală Britanică și Societatea Astronomică Regală a efectuat aceste teste prin două expediții, pe Sobral (Brazilia) și insula Principe (Africa de Vest), confirmând predicția.

Deplasarea liniilor spectrale către roșu a fost de asemenea prezisă de relativitatea generală și discutată de Einstein în aceeași carte, dar atunci când a fost scrisă această carte încă nu se confirmase cu siguranță. Se efectuaseră experimente pe benzile de cianogen, dar rezultatele nu au fost concludente în acea perioadă. Einstein propunea o verificare a deplasării medii ale liniilor spre marginea mai puțin refractabilă a spectrului, prin investigații statistice ale stelelor fixe.

³¹⁴ Albert Einstein, *Teoria relativității: Relativitatea specială și relativitatea generală* (Nicolae Sfetcu, 2017), <https://books.google.ro/books?id=aMtNDwAAQBAJ>.

³¹⁵ Einstein.

În a doua ediție a cărții *Teoria relativității- Relativitatea specială și relativitatea generală*,³¹⁶ Einstein afirmă că în dezvoltarea teoriei sale pentru "problema cosmologică" s-a bazat pe două ipoteze:

1. Există o densitate medie a materiei în întreg spațiul, care este peste tot aceeași și diferită de zero.
2. Mărimea ("raza") spațiului este independentă de timp.

Ipotezele s-au dovedit a fi conforme cu teoria generală a relativității după introducerea unui termen ipotetic la ecuațiile câmpului ("termenul cosmologic al ecuațiilor câmpului"). Ulterior, Einstein a ajuns la concluzia că se poate păstra ipoteza (1) fără a apela la acel termen, dacă cineva se poate renunța la ipoteza (2) respectiv ecuațiile inițiale ale câmpului admit o soluție în care "raza lumii" depinde de timp (expansiunea spațiului), admitând astfel expansiunea spațiului.

Hubble, printr-o investigație a nebuloaselor extra-galactice, a confirmat că liniile spectrale emise au arătat o deplasare spre roșu proporțională cu distanța dintre nebuloase.

O importanță deosebită a avut, pentru Einstein, abordarea epistemologică a experimentelor de gândire. Aceste experimentele, prin modul cum au fost elaborate, au oferit o nouă înțelegere a fenomenelor puse în discuție.

La șaisprezece ani, Einstein și-a imaginat ce s-ar întâmpla dacă **se urmează un fascicul de lumină cu viteza luminii**.³¹⁷ Experimentul este mai dificil decât pare la prima vedere. Einstein era, în acea perioadă, în căutarea unui "principiu universal" care ar putea duce la cunoașterea adevărată. Experimentul începe cu situația ipotetică de a urmări o undă de lumină cu viteza c . În acest caz al magnitudinii egale a vitezelor, "surferul" va observa o undă de lumină "înghețată", cu radiația de lumină ca un câmp electromagnetic static oscilant spațial, și proprietățile undei ar dispărea. Dar acest câmp independent de timp nu există, pentru că nu este în concordanță cu teoria lui Maxwell. Concluzia lui ar fi că un observator nu poate atinge niciodată viteza luminii, ipoteza sfiind falsă prin *modus tollens* în logica clasică. Einstein a afirmat că acest experiment conține un paradox întrucât cele două ipoteze incluse (constanța vitezei luminii și independența legilor (deci și constanței vitezei luminii) de alegerea

³¹⁶ Einstein.

³¹⁷ Einstein, „Autobiographische Skizze”, 9–17.

sistemului inerțial (principiul relativității speciale)) sunt ”reciproc incompatibile (în ciuda faptului că ambele luate separat se bazează pe experiență)”

În septembrie 1905, Einstein a încercat să extindă principiul relativității la sistemele de referință accelerate introducând un principiu fizic nou și puternic în 1907, "principiul echivalenței" (legile fizicii iau aceeași formă într-un sistem uniform de accelerare a coordonatelor ca într-un sistem care se găsește în repaus față de un câmp gravitațional omogen), cu o valoare euristică foarte mare.³¹⁸ El a argumentat acest principiu prin "**experimentul de gândire al ascensorului**", considerat uneori drept cel mai important experiment de gândire al lui Einstein. Einstein presupune un cadru de referință accelerat cu o accelerație constantă în direcția x , și un al doilea cadru în repaus într-un câmp gravitațional omogen care conferă tuturor obiectelor o accelerație în aceeași direcție x . Observațional, nu există nicio distincție între cele două cadre. Toate corpurile sunt accelerate la fel în câmpul gravitațional. Astfel, principiul echivalenței permite înlocuirea unui câmp gravitațional omogen printr-un sistem de referință uniform accelerat. Această ipoteză a echivalenței fizice exacte a celor două cadre are două consecințe teoretice importante: nu putem vorbi despre o accelerație absolută a sistemului de referință, și căderea egală a tuturor corpurilor într-un câmp gravitațional.

2.4.2 Teste ale teoriilor post-einsteiniane

Cu ajutorul formalismului PPN se confruntă teoriile gravitației cu rezultatele experimentelor din sistemul solar. Parametrul γ din acest formalism evidențiază deformarea luminii și întârzierea luminii. Prin calcule în conformitate cu PPN se obține *deformarea luminii* în raport cu liniile drepte locale, comparativ cu tije rigide; din cauza curburii spațiului în jurul Soarelui, determinată de parametrul γ , liniile locale drepte sunt îndoite în raport cu liniile drepte asimptotice departe de Soare. Dezvoltarea interferometriei radio de bază foarte lungi (VLBI) a îmbunătățit măsurarea deformării luminii, permițând observații VLBI transcontinentale și intercontinentale ale

³¹⁸ Abraham Pais, *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005), 179–80.

quasarilor și radio galaxiilor pentru a monitoriza rotația Pământului.³¹⁹ Satelitul de astrometrie optică Hipparcos a condus la o îmbunătățire a performanțelor.³²⁰

Testele de *întârziere a luminii* se bazează pe un semnal radar trimis peste sistemul solar de-a lungul Soarelui către o planetă sau satelit, și care la revenirea pe Pământ suferă o întârziere suplimentară non-newtoniană. Irwin Shapiro a descoperit acest efect în 1964. Țintele folosite includ planete precum Mercur sau Venus, ca reflectoare pasive ale semnalelor radar ("radar pasiv"), și sateliți artificiali, precum Marinerii 6 și 7, Voyager 2, Viking Mars, și nava spațială Cassini către Saturn, folosite ca transmițători activi ai semnalelor radar ("radar activ").³²¹ Kopeikin a sugerat, în 2001, să se măsoare întârzierea luminii provenită de la un quasar în momentul trecerii de planeta Jupiter,³²² măsurându-se astfel viteza interacțiunii gravitaționale. În 2002 s-au efectuat măsurători precise ale întârzierii Shapiro.³²³ Dar mai mulți autori au subliniat că acest efect nu depinde de viteza propagării gravitației, ci doar de viteza luminii.³²⁴

Explicarea *anormaliilor periheliului orbitei lui Mercur* a rămas mult timp o problemă nesoluționată jumătate de secol de la anunțul lui Le Verrier în 1859. Au fost testate mai multe ipoteze ad-hoc pentru a explica această neconcordanță cu teoria, inclusiv existența unei noi planete Vulcan lângă Soare, un inel de planetoizi, un moment quadrupolar solar, și o abatere de la pătratul invers în legea gravitației, dar toate aceste presupuneri au eșuat. Relativitatea generală a rezolvat într-un mod natural această problemă.

O altă clasă de experiențe la nivelul sistemului solar pentru gravitație verifică *principiul puternic de echivalență* (PPE). Încălcarea PPE poate fi testată prin încălcarea principiului slabei echivalențe pentru corpurile gravitaționale care conduc la perturbații în orbita Pământ-Lună, localizarea preferată și efectele cadrului preferat

³¹⁹ S. S. Shapiro et al., „Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979--1999”, *Physical Review Letters* 92, nr. 12 (26 martie 2004): 121101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.121101>.

³²⁰ François Mignard și F. Arenou, „Determination of the ppn parameter with the hipparcos data”, 1997.

³²¹ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

³²² Sergei M. Kopeikin, „Testing the Relativistic Effect of the Propagation of Gravity by Very Long Baseline Interferometry”, *The Astrophysical Journal* 556, nr. 1 (2001): L1–5, https://www.academia.edu/18481905/TESTING_THE_RELATIVISTIC_EFFECT_OF_THE_PROPAGATION_OF_GRAVITY_BY_VERY_LONG_BASELINE_INTERFEROMETRY.

³²³ E. B. Fomalont și S. M. Kopeikin, „The Measurement of the Light Deflection from Jupiter: Experimental Results”, *The Astrophysical Journal* 598, nr. 1 (20 noiembrie 2003): 704–11, <https://doi.org/10.1086/378785>.

³²⁴ Fintan D. Ryan, „Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments”, *Physical Review D* 52, nr. 10 (15 noiembrie 1995): 5707–5718, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.5707>.

în constanța gravitațională măsurată local care ar putea produce efecte geofizice observabile , și posibilele variații ale constantei gravitaționale asupra timpului cosmologic.³²⁵

De asemenea, Nordtvedt³²⁶ a afirmat că multe teorii metrice despre gravitație prevăd că corpurile masive încalcă *principiul slabei echivalențe* (căderea cu accelerații diferite, în funcție de energia lor gravitațională). Dicke³²⁷ constată că acest efect ("efectul Nordtvedt") are loc în teorii cu o constantă gravitațională variabilă spațial, precum gravitația scalar-tensorială. Efectul Nordtvedt nu este sesizat în rezultatele experimentelor de laborator, pentru obiecte de dimensiuni de laborator. Analizele datelor nu au găsit dovezi, în cadrul incertitudinii experimentale, pentru efectul Nordtvedt.³²⁸ În TGR, efectul Nordtvedt dispăre.³²⁹

Unele teorii încalcă principiul slabei echivalențe prin prezicerea faptului că rezultatele experimentelor gravitaționale locale pot depinde de viteza laboratorului în raport cu cadrul mediu de repaus al universului (*efectele cadrului preferat*, corespunzătoare parametrilor PPN α_1 , α_2 și α_3) sau de localizare a laboratorului în raport cu un corp gravitațional din apropiere (*efecte de localizare preferată*, unele fiind guvernate de parametrul PPN ξ).³³⁰ Efectele constau din variații și anizotropii în valoarea măsurată local a constantei gravitaționale care conduc la apariția unor valori anormale ale pământului și variații ale ratei de rotație a Pământului, contribuții anormale la dinamica orbitală a planetelor și a Lunii, auto-accelerații ale pulsurilor, și momentele anormale ale Soarelui care ar determina orientarea aleatorie a axei sale de rotație față de ecliptic.³³¹

Cele mai multe teorii care încalcă principiul slabei echivalențe prezic o variație a constantei gravitaționale newtoniene măsurată local, în funcție de timp.

³²⁵ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

³²⁶ Kenneth Nordtvedt, „Equivalence Principle for Massive Bodies. I. Phenomenology”, ResearchGate, 1968, 1014–16,

https://www.researchgate.net/publication/243706608_Equivalence_Principle_for_Massive_Bodies_I_Phenomenology.

³²⁷ P. G. Roll, R. Krotkov, și R. H. Dicke, „The equivalence of inertial and passive gravitational mass”, *Annals of Physics* 26 (1 februarie 1964): 26, 442–517, [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(64\)90259-3](https://doi.org/10.1016/0003-4916(64)90259-3).

³²⁸ James G. Williams, Slava G. Turyshev, și Dale H. Boggs, „Progress in Lunar Laser Ranging Tests of Relativistic Gravity”, *Physical Review Letters* 93, nr. 26 (29 decembrie 2004): 261101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.261101>.

³²⁹ Kenneth Nordtvedt, „The Relativistic Orbit Observables in Lunar Laser Ranging”, ResearchGate, 1995, 51–62, 114, https://www.researchgate.net/publication/223758280_The_Relativistic_Orbit_Observables_in_Lunar_Laser_Ranging.

³³⁰ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

³³¹ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

Alte teste pentru verificarea teoriilor gravitaționale se bazează pe *gravitomagnetism* (materia în mișcare sau rotativă produce un câmp gravitațional suplimentar analog câmpului magnetic al unei sarcini în mișcare sau al unui dipol magnetic). Efectele relativiste care pot fi măsurate implică sistemul Pământ-Lună și sistemele pulsarilor binari.³³²

Experimentele cu ajutorul *giroscopului* încearcă să detecteze această precesie a cadrelor sau efectul Lense-Thirring. Altă modalitate de a testa tragerea de cadre este măsurarea precesiei planurilor orbitale ale corpurilor care se învârt pe un corp rotativ, măsurând precesia relativă.³³³ Sistemul Pământ-Lună poate fi considerat un "giroscop", cu axa perpendiculară pe planul orbital.

O valoare non-zero pentru oricare dintre parametrii PPN ζ_1 , ζ_2 , ζ_3 , ζ_4 și α_3 ar duce la o încălcare a *conservării* momentului sau a celei de-a treia legi a lui Newton în sistemele gravitaționale. Un test pentru a treia lege a lui Newton pentru sistemele gravitaționale a fost efectuat în 1968 de Kreuzer, în care atracția gravitațională a fluorului și a bromului a fost comparată cu o precizie de 5 părți din 105. Un test la nivel planetar a fost raportat de Bartlett și van Buren.³³⁴ O altă consecință a încălcării conservării impulsului este o auto-accelerație a centrului de masă al unui sistem binar stelar.

Formalismul PPN nu mai este valabil pentru câmpurile gravitaționale puternice (stele neutronice, găuri negre), dar în unele cazuri se pot face aproximații post-newtoniene. Sistemele în câmpuri gravitaționale puternice sunt afectate de emisia de radiații gravitaționale. De exemplu, mișcarea orbitală relativistă (fuziunea sau colapsarea sistemelor binare de stele neutronice sau găuri negre în faza finală) poate fi detectată prin o rețea de observatoare cu unde de interferență gravitațională cu interferometru laser, dar analiza se face folosind tehnici diferite.

În observarea generării și deplasării undelor gravitaționale se pot folosi doar doi parametri: impulsul de masă și momentul unghiular. Ambele cantități sunt măsurabile, în principiu, prin examinarea câmpului gravitațional extern al corpurilor

³³² K. Nordtvedt, „Gravitomagnetic interaction and laser ranging to Earth satellites”, *Physical Review Letters* 61, nr. 23 (5 decembrie 1988): 61, 2647–2649, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2647>.

³³³ John C Ries et al., „Prospects for an Improved Lense-Thirring Test with SLR and the GRACE Gravity Mission”, f.a., 7.

³³⁴ D. F. Bartlett și Dave Van Buren, „Equivalence of active and passive gravitational mass using the moon”, *Physical Review Letters* 57, nr. 1 (7 iulie 1986): 21–24, 57, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.21>.

fără nicio referire la interiorul lor. Damour³³⁵ numește aceasta ca fiind o "ștergere" a structurii interne a corpului.

O altă modalitate de a verifica acordul cu TGR este prin compararea fazei observate a orbitei cu faza teoretică a modelului în funcție de timp.

Observarea undelor gravitaționale poate oferi mijloacele de a testa previziunile generale relativiste pentru polarizarea și viteza undelor, pentru amortizarea radiațiilor gravitaționale și pentru gravitația câmpului puternic, folosind detectori de unde gravitaționale cu interferometru sau cu banda rezonantă. Interferometrele laser cu bandă largă sunt deosebit de sensibile la evoluția fazelor unde gravitaționale, care transporta informații despre evoluția fazei orbitale.

O altă posibilitate implică unde gravitaționale de la o mică masă care orbitează în spirală într-o gaură neagră.³³⁶

Una dintre problemele luate în considerare de fizicieni în testarea TGR în câmp puternic este posibilitatea de contaminare cu o fizică incertă sau complexă. De exemplu, la câteva secunde după Big Bang fizica este relativ clară, dar unele teorii ale gravitației nu reușesc să producă cosmologii care să îndeplinească chiar și cerințele minime privind nucleosinteza big-bang sau proprietățile fondului cosmic de microunde.³³⁷ Dar, în cadrul unor incertitudini modeste, se poate evalua diferența cantitativă dintre predicții și alte teorii în condiții de câmp puternic comparându-se cu observațiile.³³⁸

2.4.3 Teste clasice

Albert Einstein a propus³³⁹ trei teste ale relativității generale, numite ulterior **testele clasice ale relativității generale**, în 1916:

1. precesiunea periheliului orbitei lui Mercur
2. devierea luminii de către Soare
3. deplasarea spre roșu gravitațională a luminii.

³³⁵ T. Damour, „The problem of motion in Newtonian and Einsteinian gravity.”, în *Three Hundred Years of Gravitation*, 1987, 128–98, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..128D>.

³³⁶ Ryan, „Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments”, 52, 5707–5718.

³³⁷ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*, cap. 13.2.

³³⁸ Clifford M. Will, *Was Einstein Right?: Putting General Relativity To The Test*, 2 edition (New York, NY: Basic Books, 1993).

³³⁹ Einstein, „The foundation of the general theory of relativity”, 769–822.

Pentru testările gravitaționale, se folosesc întotdeauna efectele indirecte ale gravitației, de obicei particule care sunt influențate de gravitație. În prezența gravitației, particulele se deplasează pe liniile geodezice curbate. Sursele de gravitație care cauzează curbura spațiu-timpului sunt corpuri materiale, în funcție de masa lor. Dar în relativitate masa relaționează cu energia prin formula $E = mc^2$, și energia cu impulsul, conform relativității speciale.

Ecuatiile lui Einstein dau relația dintre geometria spațială și proprietățile materiei, folosind geometria riemanniană, proprietățile geometrice fiind descrise de o funcție numită metrică. În relativitatea generală, metrica și tensorul de curbura Riemann iau valori definite în fiecare punct din spațiu-timp. Conținutul de materie definește o mărime numită tensorul energie-impuls T . Aceste cantități sunt legate între ele prin ecuațiile lui Einstein, în care tensorul de curbura Riemann și metrica definesc o altă mărime geometrică G , numită tensorul Einstein, care descrie unele aspecte ale modului în care spațiu-timpul este curbat. *Ecuatia lui Einstein* afirmă astfel că

$$G = (8\pi G/c^4) \cdot T,$$

unde mărimea G măsoară curbura iar mărimea T măsoară cantitatea de materie. G este constanta gravitațională a gravitației newtoniene, și c este viteza luminii din relativitatea specială. Fiecare din mărimile G și T sunt determinate de mai multe funcții ale coordonatelor spațiu-timp, rezultând astfel mai multe ecuații, în fapt. Fiecare soluție a acestor ecuații descrie o anumită geometrie a spațiu-timpului.

2.4.3.1 Precesia periheliului lui Mercur

Urbain Le Verrier a descoperit, în 1859, că precesia orbitală a planetei Mercur nu corespunde cu teoria: elipsa orbitei sale se rotește (precesând) puțin mai repede, diferența fiind de aproximativ 38 (corectat ulterior la 43) arcsecunde de rotație pe secol.³⁴⁰ Au fost propuse câteva ipoteze ad-hoc, precum praful interplanetar, oblația neobservată a Soarelui, o lună nedetectată de Mercur sau o nouă planetă numită Vulcan. Întrucât nicio ipoteză nu a confirmat, s-a presupus că legea gravitației lui Newton este incorectă, încercându-se modificarea legii, dar noile teorii intrau în contradicție cu alte legi. În relativitatea generală, această precesie se explică prin gravitație mediată de curbura spațiului, în acord cu observația.

³⁴⁰ U. Le Verrier, *Lettre de M. Le Verrier à M. Faye sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète*, in *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* (Paris : Gauthier-Villars, 1859), 379–383, <http://archive.org/details/comptesrendusheb49acad>.

2.4.3.2 Devierea luminii

Predicția devierii luminii a fost confirmată inițial prin observarea luminii stelelor (quasarilor) deviată în timp ce trece de Soare.³⁴¹ În formalismul PPN, devierea luminii este evidențiată prin parametrul γ , care codifică influența gravitației asupra geometriei spațiului.³⁴²

Devierea luminii de către un obiect masiv a fost prezisă încă din 1784 de Henry Cavendish, și Johann Georg von Soldner în 1801, pe baza calculelor din gravitația newtoniană. Această predicție a fost confirmată de Einstein în 1911, corectând valoarea curburii în 1915 pe baza relativității generale.³⁴³ Prima observație a devierii luminii a fost efectuată de Arthur Eddington în timpul eclipsei totale a soarelui din 29 mai 1919, simultan în Sobral, Brazilia și São Tomé și Príncipe pe coasta de vest a Africii.³⁴⁴

Devierea luminii în cazul general relativist este observată doar pentru un observator staționar care vede calea luminii în raport cu un corp gravitațional. Einstein a înțeles, folosind PEE, că masa sau chiar energia din formula lui Einstein ar urma căi geodezice în spațiu-timp, în raport cu un observator în repaus cu corpul gravitațional. Acest rezultat evidențiază esența PEE, arătând că gravitația și accelerația nu pot fi diferențiate una de alta, într-o regiune mică. Shapiro et al.,³⁴⁵ a raportat curbarea de către soare a undelor radio emise de surse radio extragalactice, între 1979 și 1999.

2.4.3.3 Deplasarea gravitațională spre roșu

Desplasarea gravitațională spre roșu apare când radiația electromagnetică de la o sursă aflată într-un câmp gravitațional este observată dintr-o regiune cu un potențial gravitațional mai mare. Este un rezultat direct al dilatării timpului gravitațional. Într-un test de confirmare a acestui efect, recepția luminii trebuie să fie amplasată la un potențial gravitațional mai mare. Dacă observatorul are un potențial gravitațional mai mic decât sursa va observa o deplasarea gravitațională spre albastru.

³⁴¹ Daniel Kennefick și Jürgen Renn, *Astronomers Test General Relativity: Light-bending and the Solar Redshift, in Albert Einstein - Chief Engineer of the Universe: 100 Authors for Einstein Essays*, 2005, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2005alei.book.....R>.

³⁴² Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

³⁴³ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

³⁴⁴ Matthew Stanley, „An Expedition to Heal the Wounds of War” The 1919 Eclipse and Eddington as Quaker Adventurer”, *Isis* 94, nr. 1 (1 martie 2003): 57–89, <https://doi.org/10.1086/376099>.

³⁴⁵ Shapiro et al., „Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979--1999”.

Einstein a prezis efectul din principiul echivalenței în 1907, afirmând că poate fi măsurat în liniile spectrale ale unei stele pitice albe care are un câmp gravitațional foarte mare. Prima măsurare precisă a unei pitice albe a fost făcută de Popper în 1954.³⁴⁶

Global Positioning System (GPS) trebuie să țină seama de deplasarea spre roșu gravitațională în sincronizare.³⁴⁷ Fizicienii au analizat datele GPS pentru a confirma alte teste.³⁴⁸ Alte teste de precizie sunt satelitul Gravity Probe A, lansat în 1976, și experimentul Hafele-Keating care a folosit ceasuri atomice în avioanele de navigație.³⁴⁹

2.4.4 Teste moderne

Dicke și Schiff au stabilit un cadru pentru testarea relativității generale,³⁵⁰ inclusiv prin experimente de nul și apelând la fizica explorării spațiului, electronicii și materiei condensate, precum experimentul Pound-Rebka și interferometria laser. Testele de lentilă gravitațională și întârzierea temporală a luminii sunt puse în evidență prin parametru γ al formalismului PPN, egal cu unu pentru relativitatea generală și cu valori diferite în alte teorii. Misiunea BepiColombo are drept unul din obiective testarea teoriei generale a relativității prin măsurarea parametrilor γ și β ai formalismului PPN.³⁵¹

2.4.4.1 Întârzierea Shapiro

Întârzierea gravitațională (întârzierea Shapiro), conform căreia semnalele luminoase necesită mai mult timp pentru a trece printr-un câmp gravitațional decât în absența aceluși câmp, a fost testată cu succes.³⁵² În formalismul PPN, întârzierea gravitațională este evidențiată prin parametrul γ , care codifică influența gravitației asupra geometriei spațiului.³⁵³

³⁴⁶ N. S. Hetherington, „Sirius B and the Gravitational Redshift: An Historical Review”, ResearchGate, 1980, 246–52, https://www.researchgate.net/publication/234478409_Sirius_B_and_the_gravitational_redshift_An_historical_review.

³⁴⁷ GPS este testat continuu prin compararea ceasurilor atomice la sol și la bordul sateliților care orbitează, pentru corelarea cu efectele relativiste, cf. lui NeilNeil Ashby, „Relativity in the Global Positioning System”, *Living Reviews in Relativity* 6, nr. 1 (28 ianuarie 2003): 1, <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1>.

³⁴⁸ Ashby, „Relativity in the Global Positioning System”.

³⁴⁹ S Schiller, „Gravitational Physics with Optical Clocks in Space”, 2015, 31.

³⁵⁰ Schiff, „On Experimental Tests of the General Theory of Relativity”, 340–343.

³⁵¹ Brans și Dicke, „Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation”, 925–935.

³⁵² Shapiro, „Fourth Test of General Relativity”, 789–791.

³⁵³ Irwin I. Shapiro et al., „Fourth Test of General Relativity: New Radar Result”, *Physical Review Letters* 26, nr. 18 (3 mai 1971): 1132–1135, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1132>.

Irwin I. Shapiro a propus acest test devenit "clasic", prezicând o întârziere relativistă la întoarcerea semnalelor radar reflectate pe alte planete. Folosirea planetelor Mercur și Venus ca ținte înainte și după ce au fost eclipsate de Soare a confirmat teoria relativității generale.³⁵⁴ Ulterior s-a folosit sonda Cassini pentru un experiment similar.³⁵⁵ Măsurarea parametrului gama PPN este afectată de efectul gravitomagnetic cauzat de mișcarea orbitală a Soarelui în jurul baricentrului sistemului solar. Interferometria de bază foarte lungă a permis corecțiile acestui efect în câmpul deplasării lui Jupiter³⁵⁶ și Saturn.³⁵⁷

2.4.4.2 Dilatarea gravitațională a timpului

Gravitația influențează scurgerea timpului. Procesele apropiate de un corp masiv se desfășoară mai lent.³⁵⁸ Deplasarea gravitațională spre roșu a fost măsurată în laborator³⁵⁹ și utilizând observațiile astronomice.³⁶⁰ Dilatarea timpului gravitațional în câmpul gravitațional al Pământului a fost măsurată folosind ceasuri atomice,³⁶¹ fiind verificată ca efect secundar al funcționării Sistemului Global de Poziționare (GPS).³⁶² Testele în câmpuri gravitaționale mai puternice apelează la observarea pulsarilor binari.³⁶³ Toate rezultatele sunt în concordanță cu relativitatea generală, dar și cu alte teorii în care principiul echivalenței este valabil.³⁶⁴

Dilatarea gravitațională a timpului coexistă cu existența unui cadru de referință accelerat, cu excepția centrului unei distribuții concentrice a materiei în care nu există un cadru de referință accelerat, deși se presupune că și aici timpul este dilatat.³⁶⁵ Toate

³⁵⁴ Shapiro et al., 1132–1135.

³⁵⁵ Sergei M. Kopeikin și Edward B. Fomalont, „Gravimagnetism, Causality, and Aberration of Gravity in the Gravitational Light-Ray Deflection Experiments”, *General Relativity and Gravitation* 39, nr. 10 (1 octombrie 2007): 1583–1624, <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0483-6>.

³⁵⁶ Kopeikin și Fomalont, 1583–1624.

³⁵⁷ Ed Fomalont et al., „Recent VLBA/VERA/IVS Tests of General Relativity”, *Proceedings of the International Astronomical Union* 5, nr. S261 (aprilie 2009): 291–295, <https://doi.org/10.1017/S1743921309990536>.

³⁵⁸ Misner, Thorne, și Wheeler, *Gravitation*.

³⁵⁹ Pound și Rebka, „Apparent Weight of Photons”, 186.

³⁶⁰ M. A. Barstow et al., „Hubble Space Telescope Spectroscopy of the Balmer Lines in Sirius B”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 362, nr. 4 (1 octombrie 2005): 1134–1142, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09359.x>.

³⁶¹ Hans C. Ohanian și Remo Ruffini, *Gravitation and Spacetime* (Norton, 1994).

³⁶² Ashby, „Relativity in the Global Positioning System”.

³⁶³ Michael Kramer, „Millisecond Pulsars as Tools of Fundamental Physics”, în *Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants*, ed. Savely G. Karshenboim și Ekkehard Peik, Lecture Notes in Physics (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004), 33–54, https://doi.org/10.1007/978-3-540-40991-5_3.

³⁶⁴ Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*.

³⁶⁵ Einstein a derivat aceste efecte folosind principiul echivalenței încă din 1907, cf. Albert Einstein, „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogene Folgerungen, in Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900-1909 Page 432 (468 of 692)”, 1907, 411, <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-doc/468>.

fenomenele fizice suferă în astfel de cazuri aceeași dilatare a timpului, în conformitate cu principiul de echivalență. Dilatarea timpului poate fi măsurată pentru fotonii care sunt emiși pe Pământ, se curbează în apropierea Soarelui, se reflectă pe Venus și revin pe Pământ de-a lungul unei căi similare. Se observă că viteza luminii în vecinătatea Soarelui este mai mică decât c . Fenomenul a fost măsurat experimental utilizând ceasuri atomice pe avioan, unde dilatările de timp apar și datorită diferențelor de înălțime mai mici de 1 metru, și au fost verificate experimental în laborator.³⁶⁶ Alte modalități de testare sunt prin experimentul Pound-Rebka, observațiile spectrelor pitice albe Sirius B, și experimentele cu semnalele de timp trimise către și de la solul lui Marte cu Viking 1.

2.4.4.3 Tragerea cadrelor și efectul geodetic

În relativitatea generală, apsidele orbitelor (punctul de pe orbita corpului cel mai apropiat față de centrul de masă al sistemului) vor precesa, formând o orbită diferită de o elipsă, de forma trandafirului. Einstein a prezis această mișcare. S-au observat precesii relativiste pentru toate planetele care permit măsurători exacte de precesie (Mercur, Venus și Pământ),³⁶⁷ și în sisteme pulsare binare unde este mai mare cu cinci ordine de mărime.

Un sistem binar care emite unde gravitaționale pierde energie. Astfel, distanța dintre cele două corpuri orbitale scade, ca și perioada lor orbitală. La nivelul sistemului solar efectul este dificil de observat. El este observabil pentru un pulsar binar apropiat, de la care se primesc impulsuri radio de frecvență foarte precisă, permițând măsurători ale perioadei orbitale. Stelele neutronice emit cantități mari de energie sub formă de radiații gravitaționale. Prima observație a acestui efect se datorează lui Hulse și Taylor, folosind un pulsar binar PSR1913+16 descoperit în 1974. Aceasta a fost prima detectare, indirectă, a undelor gravitaționale.³⁶⁸

Relativitatea direcției are mai multe efecte relativiste,³⁶⁹ precum precesiunea geodezică: direcția axei unui giroscop în cădere liberă în spațiu curbat se va schimba în comparație cu direcția luminii primite de la stelele îndepărtate.³⁷⁰ Pentru sistemul

³⁶⁶ Pound și Rebka, „Apparent Weight of Photons”, 186.

³⁶⁷ Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, 406–7.

³⁶⁸ Hulse și Taylor, „Discovery of a pulsar in a binary system”, L51–L55.

³⁶⁹ Roger Penrose, *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Reprint edition (New York: Vintage, 2007).

³⁷⁰ Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, sec. 7.8.

Lună-Pământ, acest efect a fost măsurat cu ajutorul laserului reflectat pe Lună,³⁷¹ și mai nou cu ajutorul maselor de testare la bordul sondei Gravity Probe B.³⁷²

Aproape de o masă rotativă, există efecte gravimetrice sau de tragere a cadrelor. În cazul găurilor negre rotative, orice obiect care intră în ergosferă se rotește. Efectul poate fi testat prin influența lui asupra orientării giroscopelor în cădere liberă.³⁷³ Au fost efectuate teste folosind sateliții LAGEOS,³⁷⁴ cu sonda Mars Global Surveyor din jurul lui Marte,³⁷⁵ confirmând predicția relativistă.

Primul efect de tragere a cadrulelor a fost derivat în 1918, de Josef Lense și Hans Thirring și este cunoscut ca *efectul Lense-Thirring*. Ei au prezis că rotația unui obiect masiv ar distorsiona metrica spațiu-timp, făcând orbita unei particule de test din apropiere să preceseze. Pentru a-l detecta, este necesar să examinăm un obiect foarte masiv sau să construim un instrument foarte sensibil. *Tragerea liniară a cadrelor* apare prin aplicarea principiului RG la impulsul linear. Este foarte dificil de verificat.³⁷⁶ *Creșterea masei statice* este un alt efect, o creștere a inerției unui corp atunci când alte mase sunt plasate în apropiere. Einstein afirmă că derivă din aceeași ecuație a relativității generale. Este un efect mic, dificil de confirmat experimental.

S-au făcut mai multe propuneri, costisitoare, inclusiv în 1976 de Van Patten și Everitt,³⁷⁷ pentru o misiune spațială specială care să măsoare precesia Lense-Thirring a unei perechi de nave spațiale care să fie plasate în orbite polare terestre cu aparate fără tragere. În 1986 Ciufolini a propus lansarea unui satelit geodezic pasiv pe o orbită identică cu cea a satelitului LAGEOS. Testele au început să fie realizate prin utilizarea sateliților LAGEOS și LAGEOS II în 1996.³⁷⁸ Precizia testelor este controversată. Nici experimentul Gravity Probe B nu a atins precizia dorită.³⁷⁹

³⁷¹ Kenneth Nordtvedt, „Lunar Laser Ranging - a comprehensive probe of post-Newtonian gravity”, *arXiv:gr-qc/0301024*, 7 ianuarie 2003, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0301024>.

³⁷² C. W. F. Everitt et al., „Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity”, *Physical Review Letters* 106, nr. 22 (31 mai 2011): 221101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.221101>.

³⁷³ Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, sec. 4.7.

³⁷⁴ Lorenzo Iorio, „An Assessment of the Systematic Uncertainty in Present and Future Tests of the Lense-Thirring Effect with Satellite Laser Ranging”, *Space Science Reviews* 148, nr. 1–4 (decembrie 2009): 363–381, <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9478-1>.

³⁷⁵ Lorenzo Iorio, „On the Lense-Thirring test with the Mars Global Surveyor in the gravitational field of Mars”, *Open Physics* 8, nr. 3 (1 ianuarie 2010): 509–513, <https://doi.org/10.2478/s11534-009-0117-6>.

³⁷⁶ Albert Einstein, „The Meaning of Relativity”, Princeton University Press, 1921, <https://press.princeton.edu/titles/484.html>.

³⁷⁷ R. A. Van Patten și C. W. F. Everitt, „Possible Experiment with Two Counter-Orbiting Drag-Free Satellites to Obtain a New Test of Einstein’s General Theory of Relativity and Improved Measurements in Geodesy”, *Physical Review Letters* 36, nr. 12 (22 martie 1976): 629–632, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.629>.

³⁷⁸ Iorio, „An Assessment of the Systematic Uncertainty in Present and Future Tests of the Lense-Thirring Effect with Satellite Laser Ranging”, 363–381.

³⁷⁹ Everitt et al., „Gravity Probe B”.

În cazul unor stele care orbitează în apropierea unei găuri negre supermasive, tragerea cadrelor ar trebui să determine planul orbital al stelei să preceseze în jurul axei de rotație a găurii negre, efect care ar putea fi detectat în următorii prin monitorizarea astrometrică a stelelor din centrul galaxiei Calea Lactee.³⁸⁰

Jeturile relativiste pot furniza dovezi pentru tragerea cadrelor.³⁸¹ Modelul gravitomagnetic dezvoltat de Reva Kay Williams prezice particulele de energie înaltă emise de quasari și de nuclee galactice active, extracția razelor X și γ și a perechilor e^-e^+ relativiste, jeturile colimate în jurul axei polare, și formarea asimetrică a jeturilor.

2.4.4.4 Teste ale principiului de echivalență

La începutul secolului 17 Galileo a elaborat un principiu asemănător cu cel al echivalenței când a arătat experimental că accelerația unui corp datorată gravitației este independentă de cantitatea sa de masă. Kepler a evidențiat principiul echivalenței prin un experiment de gândire, ce s-ar întâmpla dacă luna ar fi oprită pe orbită și ar cade spre Pământ.

Principiul echivalenței a jucat istoric un rol important în legea gravitației. Newton l-a luat în considerație încă din paragraful de deschidere al *Principiei*. Einstein s-a bazat și el pe acest principiu în cadrul relativității generale. Principiu de echivalență stipulat de Newton afirmă că "masa" unui corp este proporțională cu "greutatea" sa (**principiul slabei echivalențe**, PSE). O definiție alternativă a PSE este că traiectoria unui corp în absența forțelor este independentă de structura și compoziția sa internă. Un test simplu al PSE este compararea accelerației a două corpuri de compoziție diferită într-un câmp gravitațional extern. Alte experimente, de înaltă precizie, includ de la experimentele cu pendulul ale lui Newton, Bessel și Potter la măsurătorile clasice ale echilibrului de torsiune al lui Eotvos,³⁸² Dicke,³⁸³ și Braginsky.³⁸⁴ Există mai multe proiecte de îmbunătățire a valorilor măsurate cu ajutorul sateliților.

³⁸⁰ Ohanian și Ruffini, *Gravitation and Spacetime*, sec. 7.8.

³⁸¹ Pentru un observator îndepărtat jeturile par uneori să se miște mai repede decât lumina, dar asta o iluzie optică care nu încalcă principiile relativității.

³⁸² Roland V. Eötvös, Desiderius Pekár, și Eugen Fekete, „Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität”, *Annalen der Physik* 373 (1922): 11–66, 68, <https://doi.org/10.1002/andp.19223730903>.

³⁸³ R. H. Dicke, *Gravitation and the universe.*, 1969, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1969grun.book.....D>.

³⁸⁴ V. B. Braginsky și V. I. Panov, „Verification of the equivalence of inertial and gravitational mass”, *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics* 34 (1972): 34, 463–466, <https://istina.msu.ru/publications/article/4687588/>.

Principiul echivalenței lui Einstein (PEE) este mai puternic și mai cuprinzător, afirmând că PSE este valid, și rezultatele experimentelor non-gravitaționale locale sunt independente de viteze cadrelor de referință corespunzătoare și de locul și momentul în care se desfășoară. Independența de cadrul de referință este denumită invarianța Lorentz locală, iar independența de structura și compoziția sa internă este denumită invarianță de poziție locală.

Relativitatea specială a beneficiat de o serie de experimente care au contribuit ulterior la acceptarea TGR:

- experimentul Michelson-Morley și experimentele echivalente ulterioare,³⁸⁵
- Ives-Stillwell, Rossi-Hall, alte teste ale dilatării timpului,³⁸⁶
- independența vitezei luminii de viteza sursei, folosind surse stelare binare cu raze X, și pioni de înaltă energie,³⁸⁷
- izotropia vitezei luminii.³⁸⁸

În ultimii ani, oamenii de știință au început să caute încălcări aparente ale invarianței Lorentz rezultate din anumite modele de gravitație cuantică. O modalitate simplă, concretizată în formalismul c_2 , presupune că interacțiunile electromagnetice suferă o ușoară încălcare a invarianței Lorentz prin schimbarea vitezei radiației electromagnetice c în raport cu viteza limitativă a particulei de testare a particulelor,³⁸⁹ încercându-se să se selecteze un cadru de repaus universal preferat, posibil al radiației cosmice de fundal.³⁹⁰ Prin experimentele de tip Michelson-Morley se verifică viteza luminii; experimentul Brillet-Hall³⁹¹ a folosit un interferometru laser Fabry-Perot; în alte experimente, frecvențele oscilatoarelor cavității electromagnetice în diferite

³⁸⁵ A. Brillet și J. L. Hall, „Improved laser test of the isotropy of space”, *Physical Review Letters* 42 (1 februarie 1979): 42, 549–552, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.42.549>.

³⁸⁶ F. J. M. Farley et al., „The Anomalous Magnetic Moment of the Negative Muon”, *Il Nuovo Cimento A* (1965-1970) 45, nr. 1 (1 septembrie 1966): 45, 281–286, <https://doi.org/10.1007/BF02738104>.

³⁸⁷ T. Alväger et al., „Test of the second postulate of special relativity in the GeV region”, *Physics Letters* 12, nr. 3 (1 octombrie 1964): 12, 260–262, [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(64\)91095-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91095-9).

³⁸⁸ null Krisher et al., „Test of the Isotropy of the One-Way Speed of Light Using Hydrogen-Maser Frequency Standards”, *Physical Review. D, Particles and Fields* 42, nr. 2 (15 iulie 1990): 42, 731–734.

³⁸⁹ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

³⁹⁰ C. H. Lineweaver et al., „The Dipole Observed in the COBE DMR 4 Year Data”, *The Astrophysical Journal* 470 (1 octombrie 1996): 470, 38–42, <https://doi.org/10.1086/177846>.

³⁹¹ Brillet și Hall, „Improved laser test of the isotropy of space”, 42, 549–552.

orientări au fost comparate între ele sau cu ceasurile atomice, în funcție de orientarea laboratorului.³⁹²

Principiul invarianței poziției locale poate fi testat prin experimentul de deplasare gravitațională spre roșu. Primele astfel de experimente au fost seria Pound-Rebka-Snider din anii 1960 - 1965 care au măsurat schimbarea de frecvență a fotonilor cu radiații gama. Cel mai precis test standard pentru deplasarea spre roșu a fost experimentul cu rachete Vessot-Levine din iunie 1976.³⁹³ Un experiment de deplasare spre roșu "nul" efectuat în 1978 a testat dacă rata relativă a două ceasuri diferite depinde de poziție. Cele mai recente experimente au folosit tehnicile de răcire și captare a laserului și de fixare a atomilor, pentru a obține o stabilitate extremă a ceasurilor și au comparat tranziția hiperfină Rubidium-87,³⁹⁴ tranziția cvadrupol electric ionic mercur-199,³⁹⁵ tranziția atomică cu hidrogen 1S-2S,³⁹⁶ sau o tranziție optică în Ytterbium-171,³⁹⁷ împotriva tranziției hiperfine la nivelul solului în Cesium-133.³⁹⁸

Principiul echivalenței Einstein face parte din nucleu dur al programului de cercetare al lui Einstein, întrucât existența PEE implică gravitația ca un fenomen în "spațiu-timp curbat". Rezultă că singurele teorii ale gravitației care pot încorpora pe deplin PEE sunt cele care satisfac postulatele "teoriilor metrice ale gravitației", respectiv:³⁹⁹

1. Spațiutimp are o valoare simetrică.
2. Traiectoriile corpurilor care cad liber sunt geodezice ale acestei metrice.

³⁹² Paul L. Stanwix et al., „Test of Lorentz Invariance in Electrodynamics Using Rotating Cryogenic Sapphire Microwave Oscillators”, *Physical Review Letters* 95, nr. 4 (21 iulie 2005): 040404, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.040404>.

³⁹³ R. F. C. Vessot et al., „Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser”, *Physical Review Letters* 45, nr. 26 (29 decembrie 1980): 45, 2081–2084, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.2081>.

³⁹⁴ H. Marion et al., „A Search for Variations of Fundamental Constants using Atomic Fountain Clocks”, *Physical Review Letters* 90, nr. 15 (18 aprilie 2003): 90, 150801–1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150801>.

³⁹⁵ S. Bize et al., „Testing the stability of fundamental constants with the 199Hg⁺ single-ion optical clock”, *Physical Review Letters* 90, nr. 15 (18 aprilie 2003): 90, 150802–1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150802>.

³⁹⁶ M. Fischer et al., „New Limits to the Drift of Fundamental Constants from Laboratory Measurements”, *Physical Review Letters* 92, nr. 23 (10 iunie 2004): 92, 230802–1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.230802>.

³⁹⁷ E. Peik et al., „New limit on the present temporal variation of the fine structure constant”, *Physical Review Letters* 93, nr. 17 (18 octombrie 2004): 93, 170801–1–4, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.170801>.

³⁹⁸ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

³⁹⁹ Will.

3. În cadrele de referință locale care cad liber, legile non-gravitaționale ale fizicii sunt cele scrise în limbajul relativității speciale.

În 1960, Schiff a elaborat ipoteza că orice teorie completă, auto-consecventă a gravitației care întrușipează PSE întrușipează în mod necesar PEE (valabilitatea PSE în sine garantează valabilitatea invarianțelor Lorentz locală și a poziției). În acest caz rezultă, pe baza ipotezei conservării energiei, că experimentele Eotvos sunt baze empirice directe pentru PEE. Prima încercare reușită de a dovedi conjectura lui Schiff mai formal a fost făcută de Lightman și Lee,⁴⁰⁰ folosind un cadru numit "formalismul $TH\mu$ " care include toate teoriile metrice ale gravitației și multe teorii non-metrice, care folosește rata de cădere a unui corp "testat" format din particule încărcate interacționând.

Dovezile empirice care susțin principiul de echivalență Einstein afirmă că singurele teorii ale gravitației care au speranța de a fi viabile sunt teoriile metrice sau, eventual, teorii care sunt metrice în afara cuplajelor non-metrice de ordin foarte slabe sau de scurtă durată (ca în teoria corzilor).⁴⁰¹

Pot exista și alte câmpuri gravitaționale în afară de cele metrice, cum ar fi câmpurile scalare sau vectoriale, care mediază modul în care materia și câmpurile non-gravitaționale generează câmpuri gravitaționale și produc metrica; dar odată determinată metrica, numai aceasta acționează înapoi în maniera prescrisă de PEE. Astfel, se pot împărți toate teoriile metrice ale gravitației în două clase fundamentale: "pur dinamic" și "anterior geometrice."⁴⁰² În o "teorie metrică pur dinamică" câmpurile gravitaționale au structura și evoluția determinate de ecuațiile de câmp diferențial parțial cuplate. O teorie "anterior geometrică" conține "elemente absolute", câmpuri sau ecuații a căror structură și evoluție sunt date *a priori* și sunt independente de structura și evoluția celorlalte domenii ale teoriei. Relativitatea generală este o teorie pur dinamică.

Principiul puternic al echivalenței (PPE) prevede că: PSE este valabil pentru toate corpurile, și rezultatul oricărui experiment local de testare este independent de viteza aparatului și de locul și de momentul experimentului.

⁴⁰⁰ A. P. Lightman și D. L. Lee, „Restricted Proof That the Weak Equivalence Principle Implies the Einstein Equivalence Principle”, *Physical Review. D, Particles Fields* 8, nr. 2 (1973): 8, 364–376, http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:5098997.

⁴⁰¹ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

⁴⁰² Will.

Față de PSE, PPE include surse gravitaționale (planete, stele) și experimente care implică forțe gravitaționale (experimente Cavendish, măsurători gravimetrice). Rețineți că PSE include pe PEE ca un caz special în care forțele gravitaționale locale sunt ignorate. Dacă PSE este strict valabil, trebuie să existe un singur câmp gravitațional în univers, metrica g , dar nu există nicio dovadă riguroasă a acestei afirmații pînă în prezent.

Principiul echivalenței Einstein poate fi testat, pe lângă testele PSE, prin căutarea variației constantelor fără dimensiuni și a rapoartelor de masă.

Principiul puternic de echivalență implică faptul că gravitația este geometrică prin natură și nu conține câmpuri suplimentare asociate. Astfel, PPE spune că o măsurătoare a unei suprafețe de spațiu plat este absolut echivalentă cu orice altă suprafață de spațiu plat din orice altă parte a universului. Teoria relativității generale a lui Einstein este singura teorie a gravitației care satisface principiul puternic de echivalență.

PPE poate fi testat prin căutarea unei variații a constantei gravitaționale G a lui Newton, sau a variației masei particulelor fundamentale. Acestea ar rezulta din abateri de la legea forței gravitaționale din relativitatea generală, în special abateri de la proporționalitatea invers-pătratică, explicabile prin existenței forței a cincea. Alte efecte căutate sunt efectul Nordtvedt, o "polarizare" a orbitelor sistemului solar datorită accelerației gravitaționale de autogenerare cu o rată diferită de materia normală, căutat prin experimentul Lunar Laser Ranging. Alte teste includ studierea deflecției radiației de la surse radio depărtate de soare măsurată cu interferometrie de bază foarte lungă, sau măsurarea schimbării de frecvență a semnalelor către și de la nava spațială Cassini.

Teoriile cuantice ale gravitației, precum teoria corzilor și gravitația cuantică în bucle, prevăd încălcări ale principiului slabei echivalențe. În prezent, testele principiului slabei echivalențe au un grad de sensibilitate astfel încât nedesoperirea unei încălcări este la fel de profundă ca și descoperirea unei încălcări. Descoperirea încălcării principiului echivalenței ar oferi un ghid important spre unificare.⁴⁰³

Un formalism al legilor nongravitaționale ale fizicii în prezența gravitației care să încorporeze posibilitatea cuplării nonmetrice (nonuniversale) și metrice este

⁴⁰³ James Overduin et al., „The Science Case for STEP”, *Advances in Space Research* 43, nr. 10 (15 mai 2009): 1532–1537, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.02.012>.

formalismul TH conceput de Lightman și Lee.⁴⁰⁴ Acesta permite previziuni cantitative pentru rezultatele experimentărilor.

2.4.4.5 Teste ale sistemului solar

Mediul dinamic al spațiu-timpului din jurul Pământului permite efectuarea de teste ale teoriilor gravitaționale, cu sateliți geodezici ca mase de test. Un exemplu sunt sateliții LAGEOS, lansați scopuri geodezice și geodinamice, și pentru studiile fizice fundamentale. Sateliții LAGEOS sunt folosiți ca țintă pentru impulsurile laser trimise de la stațiile de la sol, pentru a calcula distanța instantanee (tehnica "laser laser range" (SLR)). Determinarea a orbitei sateliților necesită modele pentru dinamica sateliților, pentru procedurile de măsurare și pentru transformările cadrelor de referință.⁴⁰⁵ Modelele iau în considerație geopotențialul, perturbațiile lunisolare și planetare, presiunea radiației solare și albedoul Pământului, efectele Rubin-cam și Yarkovsky-Schach, coordonatele stațiilor SLR, încărcarea oceanelor, parametrii de orientare a pământului și procedura de măsurare.⁴⁰⁶ Modelele includ și corecțiile generale relativiste în formalismul parametrizat post-newtonian (PPN).⁴⁰⁷ Testele efectuate confirmă prezicerile relativității generale (precesiunea Schwarzschild, efectul Lense-Thirring) și exclud o teorie alternativă (potențialul NLRI/Yukawa).

2.4.5 Teste de câmp puternic

Când densitatea corpului devine suficient de mare, relativitatea generală prezice formarea unei găuri negre. Stelele neutronice de circa 1,4 mase solare și găurile negre sunt starea finală pentru evoluția stelelor masive.⁴⁰⁸ De obicei o gaură neagră într-o galaxie a jucat un rol important în formarea acesteia și a structurilor cosmice aferente. Astfel de corpuri oferă un mecanism eficient pentru emisia de radiații

⁴⁰⁴ Lightman și Lee, „Restricted Proof That the Weak Equivalence Principle Implies the Einstein Equivalence Principle”, 8, 364–76.

⁴⁰⁵ Friedrich W. Hehl et al., „General relativity with spin and torsion: Foundations and prospects”, *Reviews of Modern Physics* 48, nr. 3 (1 iulie 1976): 393–416, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.48.393>.

⁴⁰⁶ Emil T. Akhmedov et al., „Experimental Tests of Quantum Gravity and Exotic Quantum Field Theory Effects”, ResearchGate, 2014, https://www.researchgate.net/publication/274948108_Experimental_Tests_of_Quantum_Gravity_and_Exotic_Quantum_Field_Theory_Effects.

⁴⁰⁷ Nordtvedt și Will, „Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity”, 775–792.

⁴⁰⁸ Cole Miller, „Stellar Structure and Evolution (Lecture notes for Astronomy 606)”, 2002, <http://www.astro.umd.edu/~miller/teaching/astr606/>.

electromagnetice⁴⁰⁹ și formarea de microquasari.⁴¹⁰ Accreția poate duce la jeturi relativiste. Relativitatea generală permite modelarea acestor fenomene,⁴¹¹ confirmate prin observații.

Găurile negre sunt zonele în care sunt căutate undele gravitaționale, formate uneori prin unirea stelelor binare cu găuri negre, detectate pe Pământ; faza dinaintea fuziunii ("chirp") poate fi folosită ca o "iluminare standard" pentru a deduce distanța până la evenimentele de fuziune, servind ca probă a expansiunii cosmice la distanțe mari.⁴¹² Atunci când o gaură neagră se unește cu o altă gaură neagră supermasivă, poate furniza informații directe despre geometria găurii negre supermasive.⁴¹³

În februarie 2016 și ulterior în iunie 2016, iunie 2017 și august 2017, Advanced LIGO a anunțat că a detectat direct undele gravitaționale de la o fuziune stelară cu gaura neagră.⁴¹⁴ Undele gravitaționale pot fi detectate direct, și din studiul lor se pot afla multe aspecte ale Universului. Astronomia undelor gravitaționale se ocupă de testarea relativității generale și a teoriilor alternative, verificându-se forma prezisă a undelor și conformitatea lor cu soluțiile ecuațiilor de câmp ale teoriilor.⁴¹⁵

Alte teste pentru gravitația puternică permit observarea deplasării gravitaționale spre roșu a luminii de la steaua S2 care orbitează gaura neagră supermasivă Sagittarius A* în centrul Căii Lactee, cu ajutorul Very Large Telescope folosind GRAVITY, NACO și SIFONI.⁴¹⁶

Principiul puternic de echivalență al relativității generale în cazul corpurilor cu auto-gravitație puternică a fost testat folosind un sistem triplu stele numit PSR J0337 + 1715, format din o stea neutronică cu o stea pitică albă situat la aproximativ 4.200 de

⁴⁰⁹ R. D. Blandford, „Astrophysical black holes.”, în *Three Hundred Years of Gravitation*, 1987, 277–329, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..277B>.

⁴¹⁰ Annalisa Celotti, John C. Miller, și Dennis W. Sciama, „Astrophysical evidence for the existence of black holes”, *Classical and Quantum Gravity* 16, nr. 12A (1 decembrie 1999): A3–A21, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/16/12A/301>.

⁴¹¹ José A. Font, „Numerical Hydrodynamics in General Relativity”, *Living Reviews in Relativity* 6, nr. 1 (19 august 2003): 2, <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-4>.

⁴¹² Neal Dalal et al., „Short GRB and binary black hole standard sirens as a probe of dark energy”, *Physical Review D* 74, nr. 6 (18 septembrie 2006): 063006, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.74.063006>.

⁴¹³ Leor Barack și Curt Cutler, „LISA capture sources: Approximate waveforms, signal-to-noise ratios, and parameter estimation accuracy”, *Physical Review D* 69, nr. 8 (30 aprilie 2004): 082005, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.082005>.

⁴¹⁴ Charles Q. Choi, „Gravitational Waves Detected from Neutron-Star Crashes: The Discovery Explained”, Space.com, 2017, <https://www.space.com/38471-gravitational-waves-neutron-star-crashes-discovery-explained.html>.

⁴¹⁵ B. P. Abbott et al., „Tests of General Relativity with GW150914”, *Physical Review Letters* 116, nr. 22 (31 mai 2016): 221101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.221101>.

⁴¹⁶ R. Abuter et al., „Detection of the Gravitational Redshift in the Orbit of the Star S2 near the Galactic Centre Massive Black Hole”, *Astronomy & Astrophysics* 615 (1 iulie 2018): L15, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833718>.

ani-lumină de la Pământ care orbitează împreună cu o altă stea pitică albă situată mai departe. Observațiile, cu o precizie ridicată, compară modul în care tragerea gravitațională a piticei albe exterioară afectează pulsarul care are o autogravitație puternică și pitica albă interioară. Rezultatele au confirmat teoria generală a relativității.⁴¹⁷

2.4.5.1 Lentile gravitaționale

Când un corp astronomic masiv se află între observator și un corp îndepărtat cu o masă și distanță adecvate, se pot vedea mai multe imagini distorsionate ale corpului îndepărtat, formându-se efectul cunoscut ca lentile gravitaționale,⁴¹⁸ două sau mai multe imagini sun forma unui inel luminos cunoscut sub numele de inelul Einstein sau inele parțiale (arce).⁴¹⁹ Prima astfel de observație a fost în 1979.⁴²⁰ Efectul poate fi măsurat în funcție de strălucirea corpului îndepărtat. Lentilele gravitaționale permit detectarea prezenței și distribuției materiei întunecate, fiind un fel de "telescop natural" pentru a observa galaxiile îndepărtate și a obține o estimare independentă a constantei Hubble. Evaluările statistice ale acestora furnizează informații despre evoluția structurală a galaxiilor.⁴²¹ Se așteaptă ca observarea lentilelor gravitaționale să completeze observațiile din spectrul electromagnetic,⁴²² să furnizeze informații despre găurile negre, stelele neutronice și piticele albe și despre procesele din supernove și din universul foarte timpuriu, inclusiv despre teoria corzilor din gravitația cuantică.⁴²³

Lentilele gravitaționale se formează și la nivelul sistemului solar, cu Soarele interpus între observator și sursa îndepărtată de lumină, dar punctul de convergență al unor astfel de lentile ar fi la aproximativ 542 UA de la Soare. Această distanță însă depășește capacitățile echipamentelor sondelor și iese mult în afara sistemului solar.

⁴¹⁷ Anne M. Archibald et al., „Universality of Free Fall from the Orbital Motion of a Pulsar in a Stellar Triple System”, *Nature* 559, nr. 7712 (iulie 2018): 73–76, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0265-1>.

⁴¹⁸ Joachim Wambsganss, „Gravitational Lensing in Astronomy”, *Living Reviews in Relativity* 1, nr. 1 (2 noiembrie 1998): 12, <https://doi.org/10.12942/lrr-1998-12>.

⁴¹⁹ Bernard Schutz, „Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz”, Cambridge Core, decembrie 2003, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807800>.

⁴²⁰ D. Walsh, R. F. Carswell, și R. J. Weymann, „0957 + 561 A, B: Twin Quasistellar Objects or Gravitational Lens?”, *Nature* 279, nr. 5712 (mai 1979): 381–384, <https://doi.org/10.1038/279381a0>.

⁴²¹ Ramesh Narayan și Matthias Bartelmann, „Lectures on Gravitational Lensing”, *arXiv:astro-ph/9606001*, 3 iunie 1996, sec. 3.7, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9606001>.

⁴²² Kip S. Thorne, „Gravitational Waves”, *arXiv:gr-qc/9506086*, 30 iunie 1995, 160, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9506086>.

⁴²³ Curt Cutler și Kip S. Thorne, „An Overview of Gravitational-Wave Sources”, *arXiv:gr-qc/0204090*, 30 aprilie 2002, 4090, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0204090>.

Sursele pentru lentile gravitaționale sunt surse radio aflate la mare depărtare, în special unii quasari. Pentru detecție se folosesc telescoapele radio separate pe distanțe mari combinate prin tehnica de interferometrie de bază foarte lungă. Pentru precizie se iau în considerare efectele sistematice la nivelul Pământului, unde sunt localizate telescoapele. Observațiile au confirmat valoarea deformării prezisă de relativitatea generală.⁴²⁴

Cu ajutorul satelitului astronomic Hipparcos al Agenției Spațiale Europene s-a constatat că întregul cer este ușor distorsionat datorită deviației gravitaționale a luminii cauzată de Soare (cu excepția direcției opusă Soarelui). Aceasta necesită unele mici corecții pentru practic toate stelele.

2.4.5.2 Unde gravitaționale

Undele gravitaționale au fost prezise în 1916 de Albert Einstein.⁴²⁵ Ele sunt perturbații în geometria curbată a spațiu-timpului, generate de masele accelerate și propagându-se cu viteza luminii. Au fost confirmate pe 11 februarie 2016 de echipa Advanced LIGO.⁴²⁶ Pentru câmpurile slabe se poate face o aproximare liniară pentru aceste unde. Metodele de analiză a datelor se bazează pe descompunerea Fourier a acestor unde.⁴²⁷ Se pot obține soluții exacte fără aproximație, dar pentru undele gravitaționale produse de fuziunea a două găuri negre, metodele numerice sunt singura modalitate de a construi modele adecvate.⁴²⁸

Undele gravitaționale au fost inițial sugerate de Henri Poincaré în 1905, și poi prezise în 1916 de Albert Einstein pe baza teoriei generale a relativității. Legile mecanicii clasice nu le asigură existența, aceasta fiind una din limitările clasice. Sistemele de stele neutronice binare sunt o sursă puternică de unde gravitaționale în timpul fuzionării. Undele gravitaționale au fost detectate de observatoarele LIGO și

⁴²⁴ E. Fomalont et al., „Progress in Measurements of the Gravitational Bending of Radio Waves Using the VLBA”, *The Astrophysical Journal* 699, nr. 2 (10 iulie 2009): 1395–1402, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/699/2/1395>.

⁴²⁵ Albert Einstein, „Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation”, *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, Seite 688-696., 1916, 1: 688–696, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1916SPAW.....688E>.

⁴²⁶ B. P. Abbott, The LIGO Scientific Collaboration, și the Virgo Collaboration, „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, *Physical Review Letters* 116, nr. 6 (11 februarie 2016): 116(6): 061102, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.

⁴²⁷ Piotr Jaranowski și Andrzej Królak, „Gravitational-Wave Data Analysis. Formalism and Sample Applications: The Gaussian Case”, *Living Reviews in Relativity* 8, nr. 1 (21 martie 2005): 8 (1): 3, <https://doi.org/10.12942/lrr-2005-3>.

⁴²⁸ Edward Seidel, „Numerical Relativity: Towards Simulations of 3D Black Hole Coalescence”, *arXiv:gr-qc/9806088*, 23 iunie 1998, 6088, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9806088>.

VIRGO. Ele permit observarea fuziunii găurilor negre și studiul Universului îndepărtat, opac la radiațiile electromagnetice.

Einstein și Rosen au publicat prima versiune corectă a undelor gravitaționale în 1937.⁴²⁹ Undele gravitaționale sunt create prin accelerarea masei în spațiu, dar dacă accelerația este simetric sferică nu sunt radiate unde gravitaționale. Sistemele binare întotdeauna radiază unde gravitaționale, deoarece accelerația lor este asimetrică.

Prima detectare indirectă a undelor gravitaționale a fost în 1974 de către Hulse și Taylor, de la un pulsar binar PSR 1913 + 16, folosind detecția unei radio temporizate.⁴³⁰ Ei au descoperit că dilatarea timpului gravitațional a fost în concordanță cu predicția GR și au contrazis cele mai multe teorii alternative.⁴³¹ Prima detectare directă a undelor gravitaționale a avut loc în 2015, cu doi detectori Advanced LIGO, de la sursa GW150914, o gaură neagră binară.⁴³² Prin aceste observații s-a confirmat curbura spațiu-timp așa cum este descrisă de GR.

Joseph Weber a proiectat și construit primii detectori de undă gravitațională, în 1969 raportând că a detectat primele unde gravitaționale, raportând apoi semnale în mod regulat de la Centrul Galactic. Dar frecvența detectării a ridicat îndoieli cu privire la valabilitatea observațiilor sale.⁴³³

Unii oameni de știință nu sunt de acord cu faptul că rezultatele experimentale să fie acceptate pe baza argumentelor epistemologice. Pe baza experimentelor de detectare a undelor gravitaționale, Harry Collins a dezvoltat un argument pe care îl numește regresul "experimentatorilor":⁴³⁴ un rezultat corect este obținut cu un aparat experimental bun, respectiv unul care dă rezultate corecte. Collins susține că nu există criterii formale pentru verificarea aparatului, nici măcar prin calibrarea unui aparat prin utilizarea unui semnal "surogat".⁴³⁵ Problema se rezolvă în cele din urmă prin negociere în cadrul comunității științifice, în funcție de factori precum interesele carierei, sociale și cognitive ale oamenilor de știință, și utilitatea percepută pentru munca viitoare, dar fără a folosi criterii epistemologice sau judecată rațională. Astfel,

⁴²⁹ A. Einstein și N. Rosen, „On Gravitational Waves”, *Journal of The Franklin Institute* 223 (1 ianuarie 1937): 43–54, [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(37\)90583-0](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(37)90583-0).

⁴³⁰ Hulse și Taylor, „Discovery of a pulsar in a binary system”, L51–L53.

⁴³¹ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”, 17.

⁴³² Abbott, The LIGO Scientific Collaboration, și the Virgo Collaboration, „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, 116(061102).

⁴³³ Jorge L. Cervantes-Cota, Salvador Galindo-Uribarri, și George F. Smoot, „A Brief History of Gravitational Waves”, *Universe* 2, nr. 3 (septembrie 2016): 2 (3): 22, <https://doi.org/10.3390/universe2030022>.

⁴³⁴ Collins, *Changing Order*, 4:79-111.

⁴³⁵ Franklin și Perović, „Experiment in Physics”.

Collins afirmă că există dubii serioase cu privire la dovezile experimentale și utilizarea lor în evaluarea ipotezelor și teoriilor științifice. Exemplul dat de Collins sunt experimentele timpurii de a detecta radiațiile gravitaționale sau undele gravitaționale.⁴³⁶

Comunitatea fizică a fost forțată să compare presupunerile lui Weber cu rapoartele a șase alte experimente care nu au detectat undele gravitaționale. Collins susține că decizia dintre aceste rezultate experimentale contradictorii nu putea fi făcută pe baze epistemologice sau metodologice - cele șase experimente negative nu au putut fi considerate legitim ca replicări, și astfel au fost considerate mai puțin importante. În experimentele sale Weber a folosit un nou tip de aparat pentru a detecta un fenomen până acum neobservat, care nu a putut fi supus tehnicilor standard de calibrare.⁴³⁷

Rezultatele celorlalți oameni de știință care contraziceau pe cele ale lui Weber erau mai numeroase, și au fost verificate cu atenție, fiind confirmate și de alte grupuri de cercetători. Aceștia au investigat dacă procedura lor de analiză, un algoritm liniar, ar putea explica eșecul în observarea rezultatelor lui Weber. Au schimbat procedura cu cea folosită de Weber, un algoritm neliniar, pentru a-și analiza propriile date, dar din nou nu au găsit nicio urmă a undelor gravitaționale. Și-au recalibrat aparatele experimentale prin introducerea impulsurilor acustice de energie cunoscute și detectând astfel un semnal.⁴³⁸

Au existat și alte dubii cu privire la procedurile de analiză ale lui Weber. O eroare de programare admisă a generat coincidențe false între cei doi detectori care puteau fi interpretate, în timpul experimentelor, ca reale.

Rezultatele criticilor erau mult mai credibile din punctul de vedere a procedurilor care trebuiau respectate: au verificat rezultatele prin confirmare independentă care a inclus partajarea datelor și a programelor de analiză, au eliminat o sursă plauzibilă de eroare, și au calibrat aparatele prin injectarea de impulsuri de energie cunoscute și observând ieșirea. Allan Franklin și Slobodan Perovic consideră că comunitatea științifică a făcut o judecată motivată respingând inițial rezultatele lui Weber acceptând pe cele ale criticilor săi. Deși nu s-au aplicat reguli formale stricte, procedura a fost rezonabilă.⁴³⁹

⁴³⁶ Allan Franklin, „Calibration”, în *Can That Be Right? Essays on Experiment, Evidence, and Science*, ed. Allan Franklin, Boston Studies in the Philosophy of Science (Dordrecht: Springer Netherlands, 1999), 5: 31–80, https://doi.org/10.1007/978-94-011-5334-8_9.

⁴³⁷ Franklin și Perovic, „Experiment in Physics”.

⁴³⁸ Franklin și Perovic.

⁴³⁹ Franklin și Perovic.

O altă modalitate de detecție a undelor gravitaționale este prin interacțiunea undelor cu pereții unei cavități cu microunde, cu un formalism dezvoltat de Caves, pentru măsurarea tragerii cadrelor inerțiale⁴⁴⁰ și detecția undelor gravitaționale de înaltă frecvență.⁴⁴¹

2.4.5.3 Pulsari de sincronizare

Pulsarii sunt stele neutronice în rotație care emit unde radio în pulsuri în timp ce se rotesc, funcționând astfel ca ceasuri care permit o măsurare foarte precisă a mișcărilor lor orbitale. Observațiile acestora au arătat că precesiile lor care nu pot fi explicate prin mecanica clasică se pot explica prin relativitatea generală.⁴⁴²

Prin măsurători asupra pulsarilor binari se pot testa efectele relativiste combinate, inclusiv întârzierea Shapiro.⁴⁴³ Și, întrucât câmpul gravitațional lângă pulsari este puternic, se poate testa și PSE datorită invarianței poziției locale a obiectelor cu proprietăți puternice de auto-gravitație.⁴⁴⁴

2.4.5.4 Medii extreme

Mediile extreme de gravitație se află în apropierea unor corpuri compacte foarte masive, unde curbura spațiu-timp este foarte pronunțată iar efectele generale relativiste sunt profunde. Acestea sunt de obicei stelele neutronice și găurile negre (în special cele supermasive), nucleul galactic activ și quasarii. Abaterile de la TGR sunt cel mai probabil să apară aici, în regim de gravitație puternică. Un astfel de test, timp de 16 ani, a fost realizat de Gillessen et al.,⁴⁴⁵ pentru Sagittarius A* [Sgr A *], o sursă radio luminoasă în centrul Căii Laptelui unde se află o gaură neagră supermasivă.

⁴⁴⁰ C. M. Will, „The theoretical tools of experimental gravitation”, 1974, 1, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1974exgr.conf....1W>.

⁴⁴¹ Caves, „Theoretical investigations of experimental gravitation”.

⁴⁴² Joel M. Weisberg, David J. Nice, și Joseph H. Taylor, „Timing Measurements of the Relativistic Binary Pulsar PSR B1913+16”, *The Astrophysical Journal* 722, nr. 2 (20 octombrie 2010): 722 (2): 1030–1034, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/2/1030>.

⁴⁴³ Lijing Shao și Norbert Wex, „Tests of gravitational symmetries with radio pulsars”, *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 59, nr. 9 (septembrie 2016): 59(699501), <https://doi.org/10.1007/s11433-016-0087-6>.

⁴⁴⁴ Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*.

⁴⁴⁵ S. Gillessen et al., „Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center”, *The Astrophysical Journal* 692, nr. 2 (20 februarie 2009): 692(2), pp.1075–1109, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/1075>.

Observațiile efectuate de Hambaryan și colab.,⁴⁴⁶ au fost în totală concordanță cu TGR, o confirmare esențială pentru această teorie.

2.4.6 Teste cosmologice

Modelele cosmologice actuale sunt construite pe baza relativității generale. Soluțiile ecuațiilor specifice, Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker⁴⁴⁷ permit modelarea evoluției universului pornind de la Big Bang.⁴⁴⁸ O parte din parametrii universului au fost stabiliți prin observații. Pe baza acestora, și altor date observaționale, se pot testa modelele.⁴⁴⁹ Predicțiile includ abundența inițială de elemente chimice formate într-o perioadă de nucleosinteză în perioada Big Bang, structura ulterioară a universului,⁴⁵⁰ radiația cosmică de fond,⁴⁵¹ etc.

Observațiile privind viteza de expansiune a universului permit estimarea cantității totale de materie, dintre care unele teorii prevăd că 90% este materie întunecată, cu masă dar fără interacțiuni electromagnetice, și nu poate fi observată direct. Deplasarea gravitațională spre roșu a supernovelor și măsurătorile radiației cosmice de fond arată o dependență a evoluției universului de o constantă cosmologică cu o accelerare a expansiunii cosmice sau, alternativ, o formă de energie numită "întunecată".⁴⁵²

Din măsurătorile radiațiilor de fond cosmice,⁴⁵³ în 1980 s-a dedus existența inițială a unei faze inflaționiste, urmată de o fază de expansiune puternic accelerată după aproximativ 10^{-33} secunde, explicând astfel omogenitatea aproape perfectă a radiației cosmice de fond.

⁴⁴⁶ V. Hambaryan et al., „On the compactness of the isolated neutron star RX J0720.4-3125”, *Astronomy & Astrophysics* 601 (mai 2017): A108, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630368>.

⁴⁴⁷ Sean M. Carroll, „The Cosmological Constant”, *Living Reviews in Relativity* 4, nr. 1 (7 februarie 2001): 4 (1): 1, <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-1>.

⁴⁴⁸ La scări mari de aproximativ o sută de milioane de ani-lumină și mai mult, universul pare într-adevăr izotrop și omogen, deci modelele simplificate sunt justificate.

⁴⁴⁹ Sarah L. Bridle et al., „Precision Cosmology? Not Just Yet . . .”, *Science* 299, nr. 5612 (7 martie 2003): 299 (5612): 1532–1533, <https://doi.org/10.1126/science.1082158>.

⁴⁵⁰ Volker Springel et al., „Simulations of the Formation, Evolution and Clustering of Galaxies and Quasars”, *Nature* 435, nr. 7042 (iunie 2005): 435 (7042): 629–636, <https://doi.org/10.1038/nature03597>.

⁴⁵¹ Uroš Seljak și Matias Zaldarriaga, „Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background”, *Physical Review Letters* 78, nr. 11 (17 martie 1997): 78 (11): 2054–2057, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.2054>.

⁴⁵² Thomas Buchert, „Dark Energy from Structure: A Status Report”, *General Relativity and Gravitation* 40, nr. 2 (1 februarie 2008): 40 (2–3): 467–527, <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0554-8>.

⁴⁵³ D. N. Spergel et al., „Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology”, *The Astrophysical Journal Supplement Series* 170, nr. 2 (iunie 2007): 170 (2): 377–408, <https://doi.org/10.1086/513700>.

Fenomenele din zona găurilor negre pun în discuție conceptele noastre fundamentale despre spațiu, timp, determinism, ireversibilitate, informație și cauzalitate. În mod normal, putem considera starea actuală a Universului ca fiind efectul trecutului său și cauza viitorului său. Fiecare stare a Universului este determinată de un set de condiții inițiale și de legile fizicii. Teoremele se aplică doar obiectelor matematice, nu realității. Existența unor soluții la unele ecuații ale legilor fizice nu implică existența fizică, aceasta fiind independentă de concepțiile noastre. Soluțiile ecuațiilor dinamice nu pot prezice toate evenimentele viitoare. Relativitatea generală presupune existența tuturor evenimentelor reprezentate de o varietate topologică, deci este o teorie deterministă ontologic. Dar imposibilitatea determinării orizonturilor găurilor negre demonstrează că relativitatea generală este un exemplu de teorie care poate fi deterministă ontologic, dar totuși epistemologic nedeterminată.⁴⁵⁴

2.4.6.1 Universul în expansiune

Teoria Big Bang este principalul model cosmologic⁴⁵⁵ pentru istoria timpurie a universului și evoluția lui ulterioară. El oferă o explicație pentru o gamă largă de fenomene, inclusiv abundența elementelor luminoase, fondul cosmic de microunde, structura universului și legea lui Hubble.⁴⁵⁶ Fizicienii nu s-au pus de acord dacă că universul a început de la o singularitate sau cunoașterea noastră actuală este insuficientă pentru a deduce starea inițială. Măsurători ratei de expansiune a universului arată că universul s-a născut cu 13,8 miliarde de ani în urmă. După expansiunea inițială, universul s-a răcit formând particule subatomice și apoi atomi. Coagularea acestor elemente primordiale prin gravitație a dus la formarea stelelor și galaxiilor actuale.

Din mai multe teorii alternativă, comunitatea științifică a preferat teoria Big Bang datorită puterii sale euristice mult mai mari, coroborate cu o gamă largă de dovezi empirice, precum deplasarea spre roșu galactică analizată de Edwin Hubble în 1929, și descoperirea radiației cosmice de fundal în 1964.⁴⁵⁷ Evoluția universului este dedusă

⁴⁵⁴ Gustavo E. Romero, „Philosophical Issues of Black Holes”, *arXiv:1409.3318 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:physics]*, 10 septembrie 2014, <http://arxiv.org/abs/1409.3318>.

⁴⁵⁵ Dennis Overbye, „Cosmos Controversy: The Universe Is Expanding, but How Fast?”, *The New York Times*, 20 februarie 2017, sec. Science, <https://www.nytimes.com/2017/02/20/science/hubble-constant-universe-expanding-speed.html>.

⁴⁵⁶ E. L. Wright, „What is the evidence for the Big Bang?”, in *Frequently Asked Questions in Cosmology*, 2009, http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html#BBevidence.

⁴⁵⁷ R. B. Partridge, *3K: The Cosmic Microwave Background Radiation* (Cambridge University Press, 2007), xvii.

pornind înapoi din situația actuală, către o stare inițială de densitate și temperatură uriașe.

Acceleratoarele de particule pot replica condițiile de după primele momente ale universului, confirmând și rafinând detaliilor modelului Big Bang. Teoria Big Bang explică multe fenomene observate. Modelul Big Bang se bazează pe teoria relativității generale și pe ipoteze simplificatoare, precum omogenitatea și izotropia spațiului. Ecuatiile modelului au fost formulate de Alexander Friedmann, iar soluții similare au fost găsite de Willem de Sitter. Parametrizarea modelului Big Bang sa ca model standard, denumit modelul Lambda-CDM permite investigațiile curente ale cosmologiei teoretice.

Deducerile teoretice din fenomenele observate ne conduc la o singularitate inițială (la momentul $t = 0$), cu densitate și temperatură infinite.⁴⁵⁸ Relativitatea generală nu este în stare să descrie acest regim, și nici alte legi fizice, și nici nu se pot extrapola aceste legi dincolo de sfârșitul perioada Planck (10^{-37} secunde de la începutul expansiunii). Măsurătorile expansiunii prin observarea supernovelor și măsurarea fluctuațiilor de temperatură în mediul cosmic cu microunde arată că "vârsta universului" este de $13,799 \pm 0,021$ miliarde de ani,⁴⁵⁹ acest rezultat favorizând modelul cosmologic LCDM.

Măsurătorile de la Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) arată conformitatea cu modelul Lambda-CDM în care se presupune că materia întunecată este rece⁴⁶⁰ și reprezintă aproximativ 23% din materia/energia universului, în timp ce materia barionică reprezintă aproximativ 4,6%. Un "model extins" include materia fierbinte întunecată sub formă de neutrini.

Dovezile provenind din observarea supernovelor și radiația cosmică de fundal arată un univers dominat de o formă de energie cunoscută sub numele de energie întunecată, care permează tot spațiu, reprezentând 73% din densitatea totală a energiei din universul de astăzi. Compoziția și mecanismul său sunt necunoscute.⁴⁶¹

⁴⁵⁸ Tai L. Chow, *Gravity, Black Holes, and the Very Early Universe: An Introduction to General Relativity and Cosmology* (Springer Science & Business Media, 2007), 211.

⁴⁵⁹ P. a. R. Ade et al., „Planck 2015 Results - XIII. Cosmological Parameters”, *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octombrie 2016): 594: A13, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525830>.

⁴⁶⁰ D. N. Spergel et al., „First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe(WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters”, *The Astrophysical Journal Supplement Series* 148, nr. 1 (septembrie 2003): 148 (1): 175–194, <https://doi.org/10.1086/377226>.

⁴⁶¹ P. J. E. Peebles și Bharat Ratra, „The cosmological constant and dark energy”, *Reviews of Modern Physics* 75, nr. 2 (22 aprilie 2003): 75 (2): 559–606, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.559>.

Nucleul programului de cercetare Big Bang include două ipoteze majore: universalitatea legilor fizice și principiul cosmologic (conform căruia pe scară largă universul este omogen și izotrop). În prezent se încearcă testarea acestora din afara programului de cercetare Big Bang. Prima ipoteză a fost testată luând în considerare cea mai mare deviere posibilă a structurii fine constante pentru vârstă a universului de ordinul 10^{-5} .⁴⁶² Principiul cosmologic a fost confirmat la un nivel de 10^{-5} prin observațiile radiației cosmice de fundal.⁴⁶³

Cele mai vechi și mai directe dovezi observaționale ale Big Bang sunt expansiunea universului în conformitate cu legea lui Hubble (dedusă din deplasarea spre roșu a galaxiilor), descoperirea și măsurarea radiației cosmice de fond, și cantitățile relative ale elementelor ușoare produse de nucleosinteza Big Bang. Observațiile recente privind formarea galaxiei și evoluția și distribuția structurilor cosmice la scară largă confirmă de asemenea această teorie.⁴⁶⁴

Modelele actuale ale Big Bang introduc diverse ipoteze ad-hoc pentru fenomene fizice exotice care nu au fost observate în experimente sau încorporate în modelul standard al fizicii particulelor. Dintre acestea, ipoteza materiei întunecate este în prezent investigată la nivel de laborator.⁴⁶⁵ Pentru energia întunecată încă nu s-a găsit o modalitate de detectare, directă sau indirectă.⁴⁶⁶

Legea lui Hubble și expansiunea spațiului sunt verificate prin observații ale deplasării spre roșu ale galaxiilor și quasarelor. Expansiunea universului a fost prezisă din relativitatea generală de Alexander Friedmann în 1922⁴⁶⁷ și Georges Lemaître în 1927,⁴⁶⁸ confirmând teoria Big Bang dezvoltată de Friedmann, Lemaître, Robertson și Walker.

⁴⁶² A. V. Ivanchik, A. Y. Potekhin, și D. A. Varshalovich, „The fine-structure constant: a new observational limit on its cosmological variation and some theoretical consequences”, *arXiv:astro-ph/9810166*, 10 octombrie 1998, 343: 459, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9810166>.

⁴⁶³ Jeremy Goodman, „Geocentrism reexamined”, *Physical Review D* 52, nr. 4 (15 august 1995): 52 (4): 1821–1827, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.1821>.

⁴⁶⁴ Michael D. Gladders et al., „Cosmological Constraints from the Red-Sequence Cluster Survey”, *The Astrophysical Journal* 655, nr. 1 (ianuarie 2007): 655 (1): 128–134, <https://doi.org/10.1086/509909>.

⁴⁶⁵ Bernard Sadoulet, „The Direct Detection of Dark Matter”, ResearchGate, 1998, https://www.researchgate.net/publication/260854303_The_Direct_Detection_of_Dark_Matter.

⁴⁶⁶ Partridge, 3K, xvii.

⁴⁶⁷ A. Friedman, „On the Curvature of Space”, *General Relativity and Gravitation* 31, nr. 12 (1 decembrie 1999): 10 (1): 377–386, <https://doi.org/10.1023/A:1026751225741>.

⁴⁶⁸ Abbé G. Lemaître, „A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulae”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91, nr. 5 (13 martie 1931): 47A: 41, <https://doi.org/10.1093/mnras/91.5.483>.

Radiația fundalului cosmic cu microunde a fost descoperită în 1964 de Arno Penzias și Robert Wilson, ca un semnal omnidirecțional în banda de microunde. Aceasta a confirmat previziunile Big Bang de Alpher, Herman și Gamow în 1950.

În 1989, NASA a lansat satelitul Cosmic Background Explorer (COBE) care, în 1990, prin măsurătorile spectrului de înaltă precizie au arătat că spectrul de frecvență CMB este un corp negru aproape perfect; apoi în 1992, alte s-au descoperit fluctuații minuscule (anizotropii) la temperatura CMB de-a lungul cerului. În anii 2000-2001, mai multe experimente, precum BOOMERanG, au ajuns la concluzia că forma universului este aproape plan spațială, prin măsurarea dimensiunii unghiulare tipice ale anizotropiilor.⁴⁶⁹ În 2003, rezultatele Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) au respins unele modele specifice de inflație cosmică, dar au fost în concordanță cu teoria inflației în general.⁴⁷⁰

Abundențele relative ale elementelor depind de raportul dintre fotoni și barioni. Măsurătorile sunt în acord cu cele prognozate dintr-o singură valoare a raportului barion-foton, confirmând deplin deuteriul, aproximativ ${}^4\text{He}$, și o diferență mai mare pentru ${}^7\text{Li}$. Dar identitatea în general cu abundențele prezise de nucleosinteza Big Bang confirmă acest model.⁴⁷¹

Evoluția și distribuția galaxiilor și quasarelor sunt în acord cu Big Bang. Observațiile și teoria sugerează că primii quasari și galaxii s-au format la aproximativ un miliard de ani după Big Bang, după care s-au format clusterelor de galaxii și superclusterelor. Diferențele dintre galaxiile formate relativ recent și cele formate la scurt timp după Big Bang confirmă acest model și infirmă modelul staționar.⁴⁷²

Norii de gaze primordiale au fost confirmați în 2011, prin analizarea liniilor de absorbție în spectrele quasarelor îndepărtați. Ei nu conțin elemente mai grele, doar hidrogen și deuteriu.⁴⁷³

Vârsta universului estimată din expansiunea Hubble și CMB este în acord cu măsurătorile evoluției stelare în grupurile globulare și datarea radiometrică a stelelor individuale.

⁴⁶⁹ A. Melchiorri et al., „A measurement of Omega from the North American test flight of BOOMERANG”, *The Astrophysical Journal* 536, nr. 2 (20 iunie 2000): 536(2): L63–L66, <https://doi.org/10.1086/312744>.

⁴⁷⁰ Spergel et al., „Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results”, 170 (2): 377–408.

⁴⁷¹ Barbara Ryden, *Introduction to cosmology*, 2003, <http://adsabs.harvard.edu/abs/2003itc..book.....R>.

⁴⁷² Edmund Bertschinger, „Cosmological Perturbation Theory and Structure Formation”, *arXiv:astro-ph/0101009*, 31 decembrie 2000, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0101009>.

⁴⁷³ Michele Fumagalli, John M. O'Meara, și J. Xavier Prochaska, „Detection of Pristine Gas Two Billion Years After the Big Bang”, *Science* 334, nr. 6060 (2 decembrie 2011): 334 (6060): 1245–9, <https://doi.org/10.1126/science.1213581>.

Predicția că *temperatura CMB* a fost mai mare în trecut a fost dovedită experimental de observațiile liniilor de absorbție foarte scăzută a temperaturii în nori de gaz la deplasare spre roșu.⁴⁷⁴

2.4.6.2 Observații cosmologice

Stephen Hawking a introdus conceptul de radiație Hawkin conform căruia găurilor negre care au entropie. Acest concept afirmă că găurile negre pot radia energia, conservând entropia și rezolvă problemele de incompatibilitate cu a doua lege a termodinamicii. Pierderea energiei sugerează că găurile negre "se evaporă" în timp.

O gaură neagră acționează ca un corp negru ideal, deoarece nu reflectă lumină. Teoria câmpului cuantic în spațiu curbat prezice faptul că orizonturile evenimentului emit radiație Hawking cu același spectru ca un corp negru,⁴⁷⁵ cu o temperatură invers proporțională cu masa sa, ordinul a miliarde de grade kelvin, făcându-le în esență imposibil de observat.

Prezența unei găuri negre poate fi dedusă indirect, prin interacțiunea sa cu alte materii și radiațiile electromagnetice. Materia care cade pe o gaură neagră poate forma un disc extern de acreție, unul dintre cele mai strălucitoare obiecte din univers. Dacă există alte stele care orbitează o gaură neagră, orbitele lor pot fi folosite pentru a determina masa și locația găurii negre, după excluderea unor alternative precum stelele neutronice. În acest fel s-a stabilit că sursa radio Sagittarius A*, din centrul galaxiei Calea Laptelui, conține o gaură neagră supermasivă de aproximativ 4,3 milioane de mase solare. La 11 februarie 2016, LIGO a anunțat prima observație a undelor gravitaționale care se presupune că au fost generate dintr-o fuziune cu gaura neagră,⁴⁷⁶ iar în decembrie 2018, a fost anunțată o a altă detectare a unui eveniment de unde gravitaționale rezultate din unirea unei găuri negre cu o stea neutronică.⁴⁷⁷ Pe 10 aprilie 2019 a fost captată prima imagine a unei găuri negre cu ajutorul

⁴⁷⁴ A. Avgoustidis et al., „Constraints on the CMB Temperature-Redshift Dependence from SZ and Distance Measurements”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, nr. 02 (februarie 2012): 2012 (2): 013, <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/02/013>.

⁴⁷⁵ P. C. W. Davies, „Thermodynamics of Black Holes”, *Reports on Progress in Physics* 41, nr. 8 (august 1978): 41 (8): 1313–1355, <https://doi.org/10.1088/0034-4885/41/8/004>.

⁴⁷⁶ Abbott, The LIGO Scientific Collaboration, și the Virgo Collaboration, „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”, 116 (6): 061102.

⁴⁷⁷ LIGO Scientific Collaboration, „Detection of gravitational waves”, 2019, <https://www.ligo.org/detections.php>.

observațiilor Event Horizon Telescope din 2017 a găurii negre supermasive din centrul galactic al lui Messier 87.⁴⁷⁸

Teorema ”fără păr” afirmă că o gaură neagră stabilă are doar trei proprietăți fizice independente: masa, sarcina și momentul unghiular.⁴⁷⁹ Orice două găuri negre care cu aceleași valori pentru aceste proprietăți nu se pot distinge conform mecanicii clasice (non-cuantică). Aceste proprietăți sunt vizibile din afara unei găuri negre, putând fi măsurate.

Orizontul evenimentelor este asemănat un sistem disipativ care este aproape analog cu cel al unei membrane conductoare elastice cu frecare și rezistență electrică - paradigma membranei.⁴⁸⁰ Nu există nicio modalitate de a evita pierderea informațiilor despre condițiile inițiale, inclusiv parametrii cuantici.⁴⁸¹ Acest comportament a fost numit *paradoxul pierderii informațiilor* de gaura neagră.⁴⁸²

Existența găurilor negre sunt deduse prin observații indirecte, pe baza interacțiunilor gravitaționale cu vecinătățile acesteia.⁴⁸³

Observarea *orbitelor stelelor în jurul Sagetator A** din centrul Căi Lactee, a oferit dovezi puternice a existenței unei găuri negre supermasive.⁴⁸⁴ În plus, există unele dovezi observaționale că acest corp cosmic ar putea avea un orizont de eveniment, o caracteristică clară a găurilor negre.⁴⁸⁵

Prin conservarea momentului unghiular, gazul din puțul gravitațional al unei găuri negre formează structură asemănătoare discului în jurul obiectului (*disc de acreție*),⁴⁸⁶ emițându-se radiații electromagnetice (în principal raze X) care pot fi

⁴⁷⁸ K. L. Bouman et al., „Computational Imaging for VLBI Image Reconstruction”, în *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, 913–922, <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.105>.

⁴⁷⁹ Markus Heusler, Piotr T. Chruściel, și João Lopes Costa, „Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond”, *Living Reviews in Relativity* 15, nr. 1 (decembrie 2012): 15 (7): 7, <https://doi.org/10.12942/lrr-2012-7>.

⁴⁸⁰ Kip S. Thorne, Richard H. Price, și Douglas A. MacDonald, *Black holes: The membrane paradigm*, 1986, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1986bhmp.book.....T>.

⁴⁸¹ Componentele unui câmp cuantic din interiorul și exteriorul găurii negre vor fi în general inseparabile, dar microcausalitatea implică faptul că gradele inseparabile de libertate din gaura neagră nu se pot recombinare coerent cu cele din universul exterior. Astfel, când gaura neagră s-a evaporat complet, aceste inseparări vor dispărea, iar entropia universului va crește.

⁴⁸² Warren G. Anderson, „Black Hole Information Loss”, 1996, http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/BlackHoles/info_loss.html.

⁴⁸³ NASA, „Black Holes | Science Mission Directorate”, 2019, <https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes>.

⁴⁸⁴ Gillessen et al., „Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center”, 692 (2): 1075–1109.

⁴⁸⁵ Avery E. Broderick, Abraham Loeb, și Ramesh Narayan, „The Event Horizon of Sagittarius A*”, *The Astrophysical Journal* 701, nr. 2 (20 august 2009): 701(2): 1357–1366, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/2/1357>.

⁴⁸⁶ J. A. Marck, „Shortcut method of solution of geodesic equations for schwarzschild black hole”, *Classical and Quantum Gravity* 13, nr. 3 (1 martie 1996): 13 (3): 393–402, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/3/007>.

detectate de telescoape. În unele cazuri, discurile de acreție pot fi însoțite de jeturi relativiste emise de-a lungul poliilor, prin care se îndepărtează o mare parte din energie. Multe din fenomenele energetice ale universului sunt acumularii de materie de găurile negre, în special nucleeele galactice active și quasarii, considerate a fi discuri de acumulare a găurilor negre supermasive. În noiembrie 2011, a fost raportată prima observație directă a unui disc de acreție pentru un quasar în jurul unei găuri negre supermasive.⁴⁸⁷

Sisteme binare de stele cu raze X emit o mare parte din radiațiile lor atunci când una dintre stele preia masă de la o altă stea, existând astfel posibilitatea studierii existenței unei găuri negre.⁴⁸⁸ În acest scop a fost studiată Cygnus X-1, descoperită de Charles Thomas Bolton, Louise Webster și Paul Murdin în 1972, rezultatele nefiind certe întrucât steaua însoțitoare este mult mai grea decât gaura neagră candidată. Ulterior s-au găsit alți candidați mai buni. Lipsa discului de acreție a unui astfel de sistem se datorează unui fluxul de masă de acumulare dominat de advecție care, dacă e confirmat prin observație, este o dovadă puternică pentru prezența unui orizont al evenimentului.⁴⁸⁹ Emisiile de raze X de pe discurile de acreție ajung uneori să se comporte ca oscilații cvasi-periodice, cu frecvență dependentă de masa obiectului compact. Acest fenomen poate fi folosit pentru a determina masa găurilor negre.

Astronomii au observat anumite galaxii, denumite "active", cu caracteristici neobișnuite, precum emisia neobișnuită de linii spectrale și emisiile radio foarte puternice. Ele pot fi explicate prin prezența găurilor negre supermasive.⁴⁹⁰ Corelația observațională între masa acestei găuri și viteza de dispersie a galaxiei gazdă, cunoscută ca relația M-sigma, sugerează o legătură între formarea găurii negre și galaxia însăși.⁴⁹¹

Oamenii de știință speră ca în viitor să poată testa găurile negre prin observarea efectelor cauzate de un câmp gravitațional puternic în vecinătatea lor, precum lentila gravitațională. Există deja observații privind lentilele gravitaționale slabe, în care

⁴⁸⁷ José A. Muñoz et al., „A Study of Gravitational Lens Chromaticity with the Hubble Space Telescope”, *The Astrophysical Journal* 742, nr. 2 (1 decembrie 2011): 742 (2): 67, <https://doi.org/10.1088/0004-637X/742/2/67>.

⁴⁸⁸ Celotti, Miller, și Sciamia, „Astrophysical evidence for the existence of black holes”, 16 (12A): A3–A21.

⁴⁸⁹ Ramesh Narayan și Jeffrey E. McClintock, „Advection-dominated accretion and the black hole event horizon”, *New Astronomy Reviews*, Jean-Pierre Lasota, X-ray Binaries, Accretion Disks and Compact Stars, 51, nr. 10 (1 mai 2008): 51 (10–12): 733–751, <https://doi.org/10.1016/j.newar.2008.03.002>.

⁴⁹⁰ Julian Henry Krolik, *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment* (Princeton University Press, 1999).

⁴⁹¹ Laura Ferrarese și David Merritt, „A Fundamental Relation Between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies”, *The Astrophysical Journal* 539, nr. 1 (10 august 2000): 539 (1): 9–12, <https://doi.org/10.1086/312838>.

razele de lumină sunt deflectate cu numai câteva secunde, dar niciodată direct pentru o gaură neagră. Există mai mulți candidați în acest scop, aflați pe orbită în jurul Săgetătorului A*.⁴⁹²

Există mai multe conjecturi ad-hoc care au fost introduse pentru a explica mai bine observațiile candidaților de gaură neagră astronomică identici, dar cu mecanisme de funcționare diferite: gravastar, steaua neagră (gravitația semiclassical),⁴⁹³ steaua energiei întunecate, etc.⁴⁹⁴

Cosmologia, ca studiul universului fizic, a început ca ramură a fizicii teoretice prin modelul static al universului din 1917 al lui Einstein, dezvoltată apoi de Lemaître.⁴⁹⁵ Din 1960 cosmologia este considerată o ramură a filosofiei. Modelul standard al cosmologiei se bazează pe extrapolări ale teoriilor existente, în special relativitatea generală. Ea se bazează pe un set de soluții Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) cu o geometrie uniformă și simetrică tridimensională cu trei curburi posibile: pozitivă (spațiu sferic), zero (spațiu euclidian), și negativă (spațiu hiperbolic).

Caracteristicile de bază ale modelelor care se bazează pe soluțiile FLRW, care pot fi considerate drept nucleul dur pentru programul de cercetare cosmologic aferent, sunt: modelele sunt dinamice (univers în continuă schimbare), rata de expansiune a universului variază în funcție de diferitele tipuri de materie dominante, și modelele FLRW au o singularitate într-un timp finit în trecut (Big Bang).

În cazul modelelor FLRW există două tipuri de teste observaționale pentru verificarea lor: se studiază geometria spațiului de fundal și evoluția sa cu ajutorul materiei și radiației în univers, sau se studiază modul de formare a structurii modelului care descrie evoluția perturbațiilor mici.

Studiul observațional al geometriei universului arată că acesta este izotrop la scări suficient de mari, conform datelor rezultate din radiația cosmică a fundalului de microunde (CMB) și din surse discrete (galaxii, etc.). Studiul modul de formare a structurii modelului folosește un număr mic de parametri pentru observații din diferite perioade, folosind anizotropiile de temperatură în CMB și spectrul de putere al

⁴⁹² Valerio Bozza, „Gravitational Lensing by Black Holes”, *General Relativity and Gravitation* 42, nr. 9 (1 septembrie 2010): 42 (9): 2269–2300, <https://doi.org/10.1007/s10714-010-0988-2>.

⁴⁹³ Charles Q. Choi, „Black Hole Pretenders Could Really Be Bizarre Quantum Stars”, *Scientific American*, 2018, <https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-pretenders-could-really-be-bizarre-quantum-stars/>.

⁴⁹⁴ Philip Ball, „Black Holes «Do Not Exist»”, *Nature*, 31 martie 2005, news050328-8, <https://doi.org/10.1038/news050328-8>.

⁴⁹⁵ Lemaître, „A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulae”.

materiei prin observarea galaxiilor drept constrângeri independente ale acestor parametri, și ale parametrilor de fond.⁴⁹⁶

Modelul cosmologic standard include câteva perioade în evoluția universului tratate distinct în verificări experimentale și observaționale:⁴⁹⁷

- *Gravitația cuantică*: perioada de început, când efectele cuantice au fost esențiale în descrierea fenomenelor
- *Inflația*: o perioadă de expansiune exponențială a universului, în timpul căreia substanțele preexistente și radiațiile sunt diluate rapid, iar apoi universul este repopulat cu materie și energie prin degradarea câmpului în alte zone la sfârșitul inflației ("reîncălzirea").
- *Nucleosinteza Big Bang*: perioada în care constituenții universului includ neutronii, protonii, electronii, fotonii și neutrinii, cuplați strâns și în echilibrul termic local și apar elementele ușoare.
- *Decuplarea*: electronii devin legați în atomi stabili iar fotonii se decuplează de materie; pe măsură ce universul se expandează, fotonii se răcesc adiabatic dar păstrează un spectru al corpului negru - radiație cosmică de fundal care conține multe informații despre starea universului la decuplare.⁴⁹⁸
- *Perioada întunecată*: după decuplare, materia barionică formată din hidrogen neutru și heliu se coagulează formând stele; epoca întunecată se termină odată cu apariția luminii de la stele.
- *Formarea structurilor*: prima generație de stele se agregă în galaxii, iar galaxiile în clustere; stelele masive sfârșesc în explozii supernova și răspândesc în spațiu elemente grele create în interiorul lor, formându-se a doua generație de stele înconjurată de planete.
- *Dominația energiei întunecate*: energia întunecată (sau o constantă cosmologică non-zero) ajunge să domine expansiunea universului, ducând la o

⁴⁹⁶ Christopher Smeenk și George Ellis, „Philosophy of Cosmology”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Winter 2017 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017), <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmology/>.

⁴⁹⁷ Smeenk și Ellis.

⁴⁹⁸ P. a. R. Ade et al., „Planck 2015 Results - XX. Constraints on Inflation”, *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octombrie 2016): 594: A20, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525898>.

expansiune accelerată; expansiunea va continua la nesfârșit dacă energia întunecată este în fapt o constantă cosmologică.⁴⁹⁹

Modelul cosmologic standard include câțiva parametri liberi, precum densitatea abundenței diferitelor tipuri de materie, care pot fi măsurați în mai multe moduri cu ipoteze teoretice distincte și surse de eroare. În prezent există diferențe mari între diferitele metode de măsurare, iar semnificația și implicațiile acestor diferențe încă nu sunt clare.

Modelul standard al nucleosintezei este confirmat de mai multe dovezi independente, pentru a elimina erorile teoretice izolate sau sursele de erori sistematice.

Deși este cel mai complet, modelul cosmologic standard se lovește de trei probleme care implică necesitatea unei noi fizici:⁵⁰⁰ nu există o descriere completă a naturii sau dinamicii materiei întunecate,⁵⁰¹ energiei întunecate⁵⁰² și câmpului inflaționist;⁵⁰³ formarea galaxiilor,⁵⁰⁴ și posibila refutare a modelului în cazul în care s-ar descoperi obiecte în univers cu o vârstă mai mare decât cea determinată a universului, de cca. 13,7 miliarde de ani.⁵⁰⁵

Există opinia că actualele dovezi cosmologice nu sunt suficiente pentru a determina ce teorie științifică să alegem, iar fiecare teorie conformă cu un anumit număr de date oferă descrieri destul de diferite ale lumii. Duhem⁵⁰⁶ a caracterizat dificultatea alegerii teoriilor fizice, iar Quine⁵⁰⁷ a pledat pentru subdeterminare. Dificultatea constă în modul de caracterizare a conținutului empiric al teoriilor. Van Fraassen (1980) definește o teorie ca fiind „empiric adecvată” dacă ceea ce se spune despre fenomene observabile este adevărat. În cosmologie caracteristicile de bază ale modelului standard impun două limite fundamentale: finitudinea vitezei luminii, și

⁴⁹⁹ O explicație alternativă, în conformitate cu teoria corzilor, este că universul are dimensiuni multiple și gravitația se pierdecând gravitonii trec de la o dimensiune la alta.

⁵⁰⁰ Smeenk și Ellis, „Philosophy of Cosmology”.

⁵⁰¹ Gianfranco Bertone, Dan Hooper, și Joseph Silk, „Particle dark matter: evidence, candidates and constraints”, *Physics Reports* 405, nr. 5 (1 ianuarie 2005): 405(5–6): 279–390, <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.08.031>.

⁵⁰² Peebles și Ratra, „The cosmological constant and dark energy”, 75(2): 559–606.

⁵⁰³ David H. Lyth și Antonio Riotto, „Particle physics models of inflation and the cosmological density perturbation”, *Physics Reports* 314, nr. 1 (1 iunie 1999): 314(1–2): 1–146, [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(98\)00128-8](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(98)00128-8).

⁵⁰⁴ Joseph Silk, „Formation of Galaxies”, *The Philosophy of Cosmology*, aprilie 2017, 161–178, <https://doi.org/10.1017/9781316535783.009>.

⁵⁰⁵ G. F. R. Ellis și J. E. Baldwin, „On the Expected Anisotropy of Radio Source Counts”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 206, nr. 2 (1 ianuarie 1984): 206(2): 377–381, <https://doi.org/10.1093/mnras/206.2.377>.

⁵⁰⁶ Duhem, Vuillemin, și Broglie, *The Aim and Structure of Physical Theory*.

⁵⁰⁷ W. V. Quine, „On the Reasons for Indeterminacy of Translation”, *The Journal of Philosophy*, 1 ianuarie 1970, 67(6): 178–183, <https://doi.org/10.2307/2023887>.

faptul că teoriile care pot fi testate prin implicațiile lor pentru cosmologie implică energii prea mari pentru a fi testate pe Pamant. Ellis (2007)

Programul de cercetare al cosmologiei observaționale^{508 509} arată în ce măsuri un set de observații ideale poate determina geometria spațiu-timp pe baza unui minim de ipoteze cosmologice. Setul de date ideal presupune obiecte astrofizice care pot fi folosite ca etaloane pentru determinarea proprietăților și evoluției unor surse. În practică observatorii nu au acces la setului de date ideal, astfel încât se confruntă cu provocări în înțelegerea naturii surselor și a evoluției lor.

Conform lui Christopher Smeenk și George Ellis, problema în cosmologie este discriminarea între modelele unei teorii date, mai degrabă decât o alegere între teorii concurente. Ei dau ca exemplu simetria globală asumată în derivarea modelelor FLRW. Toate dovezile existente sunt la fel de compatibile cu modelele în care această simetrie nu este valabilă. O posibilitate ar fi ca ea să fie considerată *a priori*, sau ca o condiție prealabilă pentru teoretizarea cosmologică⁵¹⁰. recent s-a încercat justificarea modelelor FLRW apelând la un alt principiu general mai slab, coroborat cu teoreme legate de omogenitate și izotropie. Teorema Ehlers-Geren-Sachs⁵¹¹ arată că, dacă toți observatorii geodezici dintr-un model în care se acceptă expansiunea determină radiația de fond care se propagă liber este exact izotropă, atunci se confirmă modelul FLRW. Dacă trecutul cauzal este "tipic", observațiile de-a lungul liniei noastre de univers vor constrânge ce pot vedea ceilalți observatori (principiul copernican). Acest principiu se poate testa indirect, prin verificarea izotropiei prin efectul Sunyaev-Zel'dovici. Alte teste sunt directe cu un set suficient de bun de etaloane, și un test indirect bazat pe scurgerea timpului de redirectionare cosmologică. Această modalitate de lucru oferă un argument empiric conform căruia universul observat este bine aproximat de un model FLRW, transformând astfel ipoteza inițială filosofică în o bază testată observațional.⁵¹²

⁵⁰⁸ J. Kristian și R. K. Sachs, „Observations in Cosmology”, *The Astrophysical Journal* 143 (1 februarie 1966): 143: 379-399, <https://doi.org/10.1086/148522>.

⁵⁰⁹ G. F. R. Ellis et al., „Ideal observational cosmology”, *Physics Reports* 124, nr. 5 (1 iulie 1985): 124(5–6): 315–417, [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(85\)90030-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(85)90030-4).

⁵¹⁰ Claus Beisbart, „Can We Justifiably Assume the Cosmological Principle in Order to Break Model Underdetermination in Cosmology?”, *Journal for General Philosophy of Science* 40, nr. 2 (1 decembrie 2009): 40(2): 175–205, <https://doi.org/10.1007/s10838-009-9098-9>.

⁵¹¹ J. Ehlers, P. Geren, și R. K. Sachs, „Isotropic Solutions of the Einstein-Liouville Equations”, *Journal of Mathematical Physics* 9, nr. 9 (1 septembrie 1968): 9(9): 1344–1349, <https://doi.org/10.1063/1.1664720>.

⁵¹² Smeenk și Ellis, „Philosophy of Cosmology”.

Fizicianul sovietic Yakov Zeldovici a numit universul timpuriu ca fiind "acceleratorul omului sărac", pentru că prin observarea universului timpuriu se pot studia fenomene din fizica energiei înalte. Pentru gravitația cuantică, cosmologia oferă singura modalitate practică de a evalua ideile concurente.

În prezent există dezbateri privind legitimitatea diferitelor programe de cercetare în cosmologie. Un răspuns este să se recurgă la modele ipotetico-deductiviste (ID): o ipoteză devine mai de încredere cu cât una dintre consecințele ei este verificată, și invers. Dar modelul ID prezintă mai multe aspecte contestate (este adesea numit "ID naiv", similar cu falsificaționismul naiv al lui Popper). Viziunea naivă nu permite distingerea între teoriile rivale subdeterminate care fac aceleași predicții.⁵¹³ Oamenii de știință disting între teoriile care pur și simplu "se potrivesc cu datele", spre deosebire de cele care captează cu precizie legile și evaluează unele predicții de succes ca fiind mai revelatoare decât altele.

O metodologie mai sofisticată poate recunoaște explicit criteriile pe care oamenii de știință le folosesc pentru a evalua teoriile științifice,⁵¹⁴ care includ puterea explicativă, și coerența cu alte teorii, pe lângă compatibilitatea cu dovezile. Acești factori ar trebui să fie clari și discriminatorii. Alternativ, se pot considera unele dintre caracteristicile dezirabile ca parte a ceea ce constituie un succes empiric.

2.4.6.3 Monitorizări ale lentilelor slabe

Cu ajutorul telescopului spațial Hubble și Very Large Telescope s-au făcut teste ale relativității generale la scară galactică. Galaxia ESO 325-G004 acționează ca o lentilă gravitațională puternică, distorsionând lumina de la o galaxie mai îndepărtată și creând un inel Einstein în jurul centrului său. Comparând masa ESO 325-G004, prin măsurători ale mișcării stelelor din interiorul acestei galaxii, cu curbura spațiului din jurul ei, gravitația s-a comportat conform relativității generale.⁵¹⁵

Studiile privind lentilele slabe sunt în fază incipientă. Lentilele slabe produc denaturări în imaginea aparentă a dimensiunii, formei și fluxurilor obiectului astrofizic

⁵¹³ Vincenzo Crupi, „Confirmation”, 30 mai 2013, <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/confirmation/>.

⁵¹⁴ George F R Ellis, „Issues in the philosophy of cosmology”, în *Philosophy of Physics*, ed. Jeremy Butterfield și John Earman, Handbook of the Philosophy of Science (Amsterdam: North-Holland, 2007), 1183–1286, <https://doi.org/10.1016/B978-044451560-5/50014-2>.

⁵¹⁵ Thomas E. Collett et al., „A Precise Extragalactic Test of General Relativity”, *Science* 360, nr. 6395 (22 iunie 2018): 360 (6395): 1342–1346, <https://doi.org/10.1126/science.aao2469>.

folosit ca lentilă cosmică. Studiul lentilelor slabe este o metodă bună pentru testarea TGR, și o dovadă puternică a existenței energiei întunecate și materiei întunecate.⁵¹⁶

Reyes și alții au măsurat "alunecarea gravitațională", ca diferența dintre două potențiale gravitaționale diferite care definesc perturbațiile materiei. În TGR această valoare este zero sau foarte mică, dar în alte teorii este diferită de zero și conduce la diferențe substanțiale în puterea lentilelor gravitaționale.⁵¹⁷

Mai recent, Blake și colab.,⁵¹⁸ au efectuat teste asemănătoare TGR pe distanțe cosmologice, folosind date spectroscopice și imagistica. Ei au descoperit că rezultatele validează TGR.

2.5 Anomalii ale relativității generale

În timp, teoria generală a relativității a acumulat mai multe anomalii și discrepanțe, indicând necesitatea unor teorii mai bune despre gravitație sau alte moduri de abordare:

- Stelele din galaxii au o distribuție a vitezelor în creștere de la centru spre periferie, cu o variație mai mare decât cea prezisă. La fel și în cazul galaxiilor din clusterelor de galaxii. Ipoteza materiei întunecată, care ar interacționa prin gravitație dar nu electromagnetic, ar putea explica discrepanța. Există și diferite modificări ale dinamicii newtoniene care pot explica această anomalie, precum teoria MOND.
- Navele spațiale au experimentat o accelerație mai mare decât cea prezisă în timpul manevrelor gravitaționale.
- Expansiunea metrică a spațiului pare să se accelereze. Energia întunecată a fost introdusă ca o ipoteză pentru a explica acest lucru. O explicație recentă este că geometria spațiului nu este omogenă datorită grupărilor de galaxii, dar această ipoteză este contestată.⁵¹⁹

⁵¹⁶ Yong-Seon Song și Olivier Doré, „A step towards testing general relativity using weak gravitational lensing and redshift surveys”, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2009, nr. 03 (23 martie 2009): 025, <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2009/03/025>.

⁵¹⁷ Reinabelle Reyes et al., „Confirmation of general relativity on large scales from weak lensing and galaxy velocities”, *Nature* 464, nr. 7286 (martie 2010): 464(7286: 256–258, <https://doi.org/10.1038/nature08857>.

⁵¹⁸ Chris Blake et al., „RCSLenS: Testing Gravitational Physics through the Cross-Correlation of Weak Lensing and Large-Scale Structure”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, nr. 3 (1 martie 2016): 456(3): 2806–2828, <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2875>.

⁵¹⁹ Anil Ananthaswamy, „Swiss-Cheese Model of the Cosmos Is Full of Holes”, *New Scientist*, 2008, <https://www.newscientist.com/article/mg20026783-800-swiss-cheese-model-of-the-cosmos-is-full-of-holes/>.

- Măsurătorile recente arată că orbitele planetare cresc mai repede decât prin predicția pierderii masei Soarelui prin energie radiativă.
- Fotonii din radiația cosmică ar trebui să câștige energie și apoi să o piardă pe drum, dar în realitate aceștia câștigă de două ori mai multă energie decât cea prezisă de teorie. O ipoteză ar fi că gravitația scade *mai repede* decât pătratul invers la anumite scale de distanță.
- Norii de hidrogen masivi suplimentari: Liniile spectrale Lyman-alpha sugerează că norii de hidrogen sunt mai aglomerați la anumite scale decât se aștepta și, ca și fluxul întunecat, pot indica faptul că gravitația scade *mai lent* decât pătratele inverse la anumite scale de distanță.⁵²⁰

Ipotezele ad-hoc introduse în relativitatea generală pentru a explica singularitățile gravitaționale pe baza condițiilor energetice nu sunt foarte eficiente. Sunt necesare ipoteze mai detaliate asupra conținutului materiei.⁵²¹ Mulți oameni de știință și filosofi au ajuns la concluzia că singularitățile trebuie să fie asociate cu atingerea limitelor valabilității fizice a relativității generale, fiind nevoie să se dezvolte o nouă teorie, a gravitației cuantice.

O singularitate care poate influența cauzal anumite părți din spațiu este numită *singularitate goală*. Penrose a propus eliminarea singularităților goale folosind ipoteza cenzurii cosmice.⁵²² Demonstrarea ipotezei cenzurii cosmice este una din problemele matematice centrale ale relativității generale.

În opinia unor oameni de știință, relativitatea generală conține germenii propriei distrugerii, întrucât teoria nu este capabilă să prezică fizica la scara Planck, iar probleme precum non-renormalizabilitatea și singularitățile sunt ”cunoscute necunoscute.”⁵²³

2.6 Punctul de saturație al relativității generale

Conform metodologiei programelor de cercetare a lui Lakatos, relativitatea generală poate fi divizată în mai multe perioade: perioada inițială, perioada de

⁵²⁰ Marcus Chown, „Gravity May Venture Where Matter Fears to Tread”, New Scientist, data accesării 3 mai 2019, <https://www.newscientist.com/article/mg20126990-400-gravity-may-venture-where-matter-fears-to-tread/>.

⁵²¹ Alan D. Rendall, „The nature of spacetime singularities”, *arXiv:gr-qc/0503112*, noiembrie 2005, 76–92, https://doi.org/10.1142/9789812700988_0003.

⁵²² R. Penrose, „Singularities and time-asymmetry.”, 1979, 581–638, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1979grec.conf..581P>.

⁵²³ Tong, *String Theory*.

stagnare, perioada de maturitate, și punctul de saturație. Perioada inițială (1887-1919) include cele două mari experimente ale fizicii relativiste, experimentul Michelson-Morley și experimentul Eotvos, și cele două confirmări, deformarea luminii și avansul perihelilui lui Mercur. A urmat apoi o perioadă de stagnare (1920-1960) în timpul căreia teoria a luat-o înaintea posibilităților tehnologice și experimentale, teoria fiind chiar scoasă din manualele de fizică și al astronomie.

Maturitatea teoriei începe în 1960, când descoperirile astronomice și noile experimente au atras atenția asupra TGR. Această perioadă (1960 - 1980) a fost numită de Will drept "o era de aur",⁵²⁴ în care au fost sistematizate predicțiile observabile ale TGR, comparate cu alte teorii alternative, și au fost propuse noi experimente pentru testare. Primul experiment din această perioadă a fost elaborat pentru confirmarea schimbării de frecvență gravitațională a luminii (1960) și s-a încheiat cu confirmarea predicției TGR a pierderii de energie a undelor gravitationale (1979) prin observarea pulsarului binar Hulse-Taylor.

Din 1980 a început zona de saturație a TGR, denumită de Will "căutarea unei gravitații puternice". Parte din noile previziuni ale teoriei sunt nesemnificative și dificil de verificat, în unele cazuri necesitând tehnologii încă nedezvoltate. Teoria a început să fie atacată prin noile teorii sau tehnici experimentale, precum utilizarea de atomi și capcane ionice răcite cu laser pentru a efectua teste ultra-precise, propunerea unei "a cincea" forțe, sau dimensiuni suplimentare pentru testarea legii pătrate inverse a gravitației. A început să se acorde o atenție din ce în ce mai mare efectelor câmpurilor gravitaționale puternice, în apropierea orizontului evenimentului unei găuri negre nerotative, în stelele neutronice sau, pentru universul extins, câmpuri gravitaționale asociate la scara Planck.

În ecuațiile lui Einstein din relativitatea generală clasică rămâne o asimetrie fundamentală între câmpurile gravitaționale și cele non-gravitaționale: pe partea stângă, un obiect geometric ($g_{\mu\nu}$, tensorul Einstein), reprezentând curbura spațiu-timpului, este identic cu reprezentarea fenomenologică tensorială, dar non-geometrică, a materiei din partea dreaptă.

$$(1) G_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu}, \text{ unde } G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - (1/2)g_{\mu\nu}R$$

⁵²⁴ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

Astfel în prelegerea pentru premiul Nobel din iulie 1923, Einstein afirma:

”Cei care caută unificarea teoriei nu pot fi satisfăcuți de existența a două domenii care, prin natura lor, sunt destul de independente. Este căutată o teorie de câmp unificat matematic, în care câmpul gravitațional și câmpul electromagnetic sunt interpretate ca fiind doar diferite componente sau manifestări ale aceluiași câmp uniform ... Teoria gravitațională, considerată în termeni de formalism matematic, adică geometria Riemanniană, ar trebui generalizată astfel încât să includă legile câmpului electromagnetic.”⁵²⁵

Există dovezi teoretice care infirmă PEE în anumite cazuri, prin efecte gravitaționale cuantice, efecte derivate din teoria corzilor, sau prin alte interacțiuni nedetectate până în prezent. În teoria corzilor există astfel de câmpuri care încalcă PEE, dar teoria nu este încă suficient de matură pentru a concretiza o astfel de refutare. Clifford M. Will afirmă că observarea unor efecte care par să încalce PEE ține, într-o oarecare măsură, de semantică. Câmpurile implicate de teoria corzilor pot fi de lungă distanță și pot imita câmpurile gravitaționale, dar nu s-a găsit nicio modalitate de a face acest lucru.⁵²⁶ Ideea utilizării testelor PEE în acest mod a apărut în anii 1980, în căutarea unei "a cincea" forțe⁵²⁷ ca o forță de aproximativ un procent din gravitație dar cu un interval de câteva sute de metri, implicând o deviație de la legea inverso-pătrată a gravitației newtoniene. Ideea a apărut cu ocazia măsurătorilor profilului gravitațional din minele adânci din Australia și din noile idei din fizica particulelor sugerând posibila prezență a particulelor de masă foarte mică cu gravitație. Numeroase experimente au căutat dovezi ale acestei forțe prin măsurarea unor diferențe de accelerație în funcție de compoziție, dar rezultatele nu au fost concludente, consensul fiind că nu există dovezi credibile experimentale pentru o a cincea forță.⁵²⁸

Posibilitatea ca legea patrată inversă să fie încălcată la intervale foarte scurte în verificările de laborator⁵²⁹ prevedea că unele dintre dimensiunile spațiale suplimentare din teoria corzilor ar putea să se extindă peste scalele macroscopice. La scară mică gravitația ar devia de la legea cunoscută. Au fost elaborate multe metode de înaltă

⁵²⁵ Albert Einstein, *Fundamental Ideas and Problems of the Theory of Relativity: Lecture Delivered to the Nordic Assembly of Naturalists at Göteborg on July 11, 1923* (Nobel Museum, 2009), 489.

⁵²⁶ Will, „The Confrontation between General Relativity and Experiment”.

⁵²⁷ Fischbach et al., „Reanalysis of the Eotvos experiment”, 56, 3–6.

⁵²⁸ C. M. Will, „Twilight time for the fifth force?”, 1990, 80, 472–479, <http://connection.ebscohost.com/c/articles/9011192203/twilight-time-fifth-force>.

⁵²⁹ Lisa Randall și Raman Sundrum, „An Alternative to Compactification”, *Physical Review Letters* 83, nr. 23 (6 decembrie 1999): 83, 4690–4693, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4690>.

precizie și zgomot redus, adaptate pentru teste de laborator. Nu s-au găsit abateri de la legea pătrată inversă.⁵³⁰

Singularitățile gravitaționale sunt considerate ca fiind o limită a spațiu-timpului. Relativitatea generală permite existența singularităților, dar nu poate spune nimic despre ceea ce se întâmplă în interiorul lor, iar oamenii de știință nu s-au pus încă de acord asupra unei definiții a acestora, luând în considerare și faptul că fără o geometrie conformă cu legile fizicii nu poate exista o locație în spațiu-timp. În concluzie, spun aceștia, nu se poate vorbi de singularități, ci mai degrabă de spațiu-timpuri singulare, deși în principiu acești termeni sunt echivalenți.⁵³¹ Clarke⁵³² și Earman,⁵³³ ca și Geroch, Can-bin și Wald⁵³⁴ și Curiel,⁵³⁵ susțin că este nevoie de o definiție precisă, riguroasă și univocă a singularității pentru o mai bună abordare a acestora și pentru o modelare mai exactă a aspectelor spațio-temporale.⁵³⁶ Este comună afirmația că relativitatea generală, considerând spațiu-timpul ca fiind singular, își prezice propriile neputințe la limita singularităților găurilor negre și la Big Bang, negând realitatea acestora. Se speră că o teorie mai fundamentală, eventual a gravitației cuantice, va rezolva această problemă.⁵³⁷

Găurile negre apar, conform relativității generale, atunci când corpul cosmic a colapsat sub așa-numita rază Schwarzschild, proporțională cu masa corpului. "Orizontul evenimentului" unei găuri negre este punctul de unde nu mai există întoarcere, în interiorul căruia atracția gravitațională este mai mare decât orice încercare de a ieși din această zonă, inclusiv pentru lumină.⁵³⁸ Pentru o gaură neagră standard (neîncărcată, care nu se rotește), orizontul evenimentului se află la raza

⁵³⁰ Joshua C. Long et al., „Upper Limits to Submillimetre-Range Forces from Extra Space-Time Dimensions”, *Nature* 421, nr. 6926 (februarie 2003): 421, 922–925, <https://doi.org/10.1038/nature01432>.

⁵³¹ Erik Curiel, „Singularities and Black Holes”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Spring 2019 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2019), <https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/spacetime-singularities/>.

⁵³² C. J. S. Clarke, „The Analysis of Space-Time Singularities by C. J. S. Clarke”, Cambridge Core, mai 1994, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511608155>.

⁵³³ John Earman, „Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks: Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes”, *British Journal for the Philosophy of Science* 49, nr. 2 (1998): 338–347.

⁵³⁴ Robert Geroch, Liang Can-bin, și Robert M. Wald, „Singular boundaries of space-times”, *Journal of Mathematical Physics* 23, nr. 3 (1 martie 1982): 23(3): 432–435, <https://doi.org/10.1063/1.525365>.

⁵³⁵ Erik Curiel, „The Analysis of Singular Spacetimes”, *Philosophy of Science* 66, nr. 3 (1999): 66(S1): S119–S145.

⁵³⁶ Nicolae Sfetcu, *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale* (MultiMedia Publishing, 2018), <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.17470.18242>.

⁵³⁷ Abhay Ashtekar și Martin Bojowald, „Quantum geometry and the Schwarzschild singularity”, *Classical and Quantum Gravity* 23, nr. 2 (21 ianuarie 2006): 23(2): 391–411, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/2/008>.

⁵³⁸ O descriere mai exactă distinge și alte tipuri de orizont, precum orizonturile aparente, cf. Hawking et al., *The Large Scale Structure of Space-Time*, 312–20.

Schwarzschild. Din punctul de vedere al unei persoane aflate în afara orizontului evenimentului, timpul în apropierea unei găuri negre se dilată datorită gravitației puternice, până când intervalele temporale ajung infinit de mari în interiorul orizonturilor evenimentelor. Din perspectiva persoanei care intră în orizontul evenimentelor, nu se întâmplă nimic neobișnuit. Timpul se scurge la fel și nu realizează că a intrat în interiorul orizontului evenimentelor.

Găurile negre relativiste sunt entități pur gravitaționale. Ele sunt soluții de "vid" a ecuațiilor câmpului lui Einstein. În contextul relativității generale, Erik Curiel afirmă că se renunță la gravitație și se postulează o geometrie curbă a spațiului temporal care produce toate efectele gravitației, gaura neagră nefiind un "lucru" în spațiu, ci o caracteristică a spațiu-timpului în sine.⁵³⁹ Materia stelei colapsante dispare în singularitatea gaurii negre, rămânând doar proprietățile geometrice ale gaurii negre (masa, sarcina și momentul unghiular), conform unor teoreme numite "fără păr", indiferent de proprietățile fizice anterioare ale obiectelor care se prăbușesc într-o gaură neagră.

O singularitate "goală" nu are un orizont al evenimentelor. Aceasta presupune o ruptură fundamentală în structura a spațiu-timpului.⁵⁴⁰ ⁵⁴¹ O versiune a unei singularități goale este "gaura albă", o gaură neagră inversată în timp, din care ar putea să apară materie și obiecte din nimic. Deoarece ecuațiile câmpului relativității generale nu selectează o direcție preferată a timpului, iar formarea unei găuri negre este permisă, atunci și găurile albe vor fi permise de aceste legi.⁵⁴² Roger Penrose afirmă că singularitățile goale nu se vor forma niciodată, introducând o ipoteză ad-hoc denumită "ipoteza cenzurii cosmice": o singularitate se va afla întodeauna într-o gaură neagră care este înconjurată de orizontul evenimentelor. Datorită unor contraexemple, această ipoteză a fost abandonată în timp. Au fost propuse mai multe ipoteze alternative pentru eliminarea posibilității singularităților goale care încalcă principiul cauzalității,⁵⁴³ ⁵⁴⁴ dar niciuna nu este considerată satisfăcătoare până în prezent.

Găurile negre oferă un teren de testare esențial pentru problemele conceptuale care stau la baza gravitației cuantice și a relativității generale, referitor la încălcarea

⁵³⁹ Curiel, „Singularities and Black Holes”.

⁵⁴⁰ Sfetcu, *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale*.

⁵⁴¹ Earman, „Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks”, 65–66.

⁵⁴² Curiel, „Singularities and Black Holes”.

⁵⁴³ Pankaj S. Joshi, „Cosmic Censorship: A Current Perspective”, *arXiv:gr-qc/0206087*, 28 iunie 2002, 17(15): 1067–1079, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0206087>.

⁵⁴⁴ Earman, „Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks”, cap. 3.

conservării energiei și a microcauzalității, și paradoxul pierderii informației. Gravitația cuantică pare a fi cel mai bun candidat pentru o modelare a acestor fenomene.

În 1971, Hawking a introdus conjectura că suprafața totală a orizonturilor evenimentului din orice grupare de găuri negre nu scade, chiar dacă acestea se unesc (a doua lege a mecanicii găurilor negre, prin similitudine cu entropia în termodinamică).⁵⁴⁵ Pentru a evita ca găurile negre să aibă entropie zero, Bekenstein a propus ca o gaură neagră să aibă o entropie proporțională cu aria orizontului ei.⁵⁴⁶ Hawking a descoperit că teoria câmpului cuantic prezice că o gaură neagră se comportă ca un corp negru care radiază la o temperatură constantă, încălcând astfel a doua lege a mecanicii găurilor negre datorită pierderii de energie și deci a micșorării. Dar radiația îndepărtează și entropia, și deci suma entropiei materiei este în creștere. Aceasta permite formularea primei legi a mecanicii găurilor negre similar cu prima lege a termodinamicii, cu masa acționând ca energie, gravitația suprafeței ca temperatură, și aria ca entropie.⁵⁴⁷ În această interpretare a găurii negre, relativitatea generală este nesatisfăcătoare, fiind nevoie de o teorie mai bună a gravitației cuantice.⁵⁴⁸

O gaură neagră păstrează doar informațiile referitoare la masa totală, sarcina și momentul unghiular. Teoria găurilor negre stabile afirma că această pierdere nu e o problemă, deoarece informațiile pot fi considerate ca fiind prezente în gaura neagră, inaccesibile din exterior dar reprezentate în orizontul evenimentului în conformitate cu principiul holografic. Dar în teoria că găurile negre se evaporă încet prin emisia de radiații Hawking, informațiile despre materia care a format gaura neagră se pierd iremediabil. În mecanica cuantică, pierderea informațiilor corespunde încălcării unitarității, legată de conservarea probabilității, rezultând încălcarea conservării energiei.⁵⁴⁹ Ultimele studii arată că informațiile și unitaritatea sunt păstrate totuși într-un tratament cuantic al problemei.⁵⁵⁰

⁵⁴⁵ S. W. Hawking, „Gravitational Radiation from Colliding Black Holes”, *Physical Review Letters* 26, nr. 21 (24 mai 1971): 26 (21): 1344–1346, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1344>.

⁵⁴⁶ Robert M. Wald, „The Thermodynamics of Black Holes”, *Living Reviews in Relativity* 4, nr. 1 (9 iulie 2001): 4 (1): 6, <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-6>.

⁵⁴⁷ Wald, 4 (1): 6.

⁵⁴⁸ S. Carlip, „Black Hole Thermodynamics and Statistical Mechanics”, în *Physics of Black Holes: A Guided Tour*, ed. Eleftherios Papantonopoulos, Lecture Notes in Physics (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009), 769: 89–123, https://doi.org/10.1007/978-3-540-88460-6_3.

⁵⁴⁹ Steven B. Giddings, „The black hole information paradox”, *arXiv:hep-th/9508151*, 28 august 1995, <http://arxiv.org/abs/hep-th/9508151>.

⁵⁵⁰ Samir D. Mathur, „The Information Paradox: Conflicts and Resolutions”, *Pramana* 79, nr. 5 (1 noiembrie 2012): 1059–73, <https://doi.org/10.1007/s12043-012-0417-z>.

În cazul unui corp care cade într-o gaură neagră, teoria câmpului cuantic în spațiu curbat implică cuante ale radiației Hawking, incluzând doar o cantitate finită de informații codificate în radiația Hawking. Dar inseparabilitatea particulei la ieșire de toată radiația Hawking pe care gaura neagră a emis-o anterior creează un paradox numit "monogamia inseparabilității."⁵⁵¹ Pentru rezolvarea paradoxului, ar trebui să se renunțe la una din cele trei teorii testate în timp: principiul echivalenței lui Einstein, unitaritatea, sau teoria câmpului cuantic existentă. Renunțarea la principiul echivalenței implică un "paravan" care distruge particulele de intrare în orizontul evenimentului.⁵⁵² Datele LIGO din 2016 arată posibile semnale de ecouri datorate unui orizont fuzzy de evenimente, posibile în teoriile paravanului, dar imposibile în relativitatea generală clasică.⁵⁵³

Necesitatea unei consistențe între teoria cuantică și relativitatea generală,⁵⁵⁴ și existența singularităților, impun apariția unei teorii complete a gravitației cuantice.⁵⁵⁵ Până în prezent nu s-a reușit să se dezvolte o astfel de teorie completă și consecventă, deși există mai mulți candidați.⁵⁵⁶

Generalizarea teoriei câmpului cuantic din fizica particulelor elementare astfel încât să includă gravitația, a eșuat.⁵⁵⁷ La energii joase teoria este acceptabilă, dar la energii foarte mari, rezultatele sunt foarte divergente și duc la modele fără putere predictivă.⁵⁵⁸

O încercare de eliminare a acestor limitări este teoria corzilor, o teorie cuantică. Teoria promite o unificare a gravitației cu celelalte forțe, suplimentând cele trei dimensiuni spațiale cu încă șase.⁵⁵⁹ O versiune mai nouă a teoriei, teoria supercorzilor,

⁵⁵¹ Zeeya Merali, „Astrophysics: Fire in the Hole!”, *Nature News* 496, nr. 7443 (4 aprilie 2013): 20–23, <https://doi.org/10.1038/496020a>.

⁵⁵² Jennifer Ouellette, „Black Hole Firewalls Confound Theoretical Physicists”, *Scientific American*, 2012, <https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-firewalls-confound-theoretical-physicists/>.

⁵⁵³ Zeeya Merali, „LIGO Black Hole Echoes Hint at General-Relativity Breakdown”, *Nature News*, 2016, 540, <https://doi.org/10.1038/nature.2016.21135>.

⁵⁵⁴ S. Carlip, „Quantum Gravity: a Progress Report”, *Reports on Progress in Physics* 64, nr. 8 (1 august 2001): sec. 2, <https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301>.

⁵⁵⁵ Schutz, „Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz”, 407.

⁵⁵⁶ Herbert W. Hamber, *Quantum Gravitation: The Feynman Path Integral Approach* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009), <https://www.springer.com/gp/book/9783540852926>.

⁵⁵⁷ G. 't Hooft și M. Veltman, „One-loop divergencies in the theory of gravitation”, *Annales de L'Institut Henri Poincaré Section (A) Physique Theorique* 20 (1974): 20 (1): 69, <http://adsabs.harvard.edu/abs/1974AIHPA..20...69T>.

⁵⁵⁸ Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume 2: Modern Applications*, 1 edition (Cambridge: Cambridge University Press, 2005).

⁵⁵⁹ M. B. Green, J. H. Schwarz, și E. Witten, „Superstring Theory. Vol. 1: Introduction”, *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik* 68, nr. 6 (1988): 258–258, <https://doi.org/10.1002/zamm.19880680630>.

se încearcă o unificare a relativității generale și supersimetriei, sub numele de supergravitație,⁵⁶⁰ și un model ipotetic unificator cu unsprezece dimensiuni cunoscut sub numele de teoria-M.⁵⁶¹

O altă abordare folosește cuantizarea canonică a teoriei cuantice în care, pornind de la relativitatea generală e ajunge la ecuația Wheeler-deWitt, un analog al ecuației Schrödinger, dar care s-a dovedit a fi greșit definită.⁵⁶² Prin introducerea unor ipoteze ad-hoc (variabile) Ashtekar, a dezvoltat teoria gravitației cuantice în bucle.⁵⁶³

Există numeroase alte încercări de a ajunge la o teorie viabilă a gravitației cuantice, bazate pe abordarea traseului Feynman și calculul Regge, triangulațiile dinamice, seturile de cauzalitate, modelele twistor⁵⁶⁴ sau modelele bazate pe integrale de căi ale cosmologiei cuantice.⁵⁶⁵ Toate teoriile candidate au încă probleme majore formale și conceptuale greu de depășit deocamdată, inclusiv imposibilitatea verificării predicțiilor prin teste experimentale.⁵⁶⁶

⁵⁶⁰ Steven Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Volume 3: Supersymmetry*, 1st Edition edition (Cambridge: Cambridge University Press, 2005).

⁵⁶¹ P. K. Townsend, „Four Lectures on M-theory”, *arXiv:hep-th/9612121*, 11 decembrie 1996, 13: 385, <http://arxiv.org/abs/hep-th/9612121>.

⁵⁶² Karel Kuchař, „Canonical Quantization of Gravity”, *Relativity, Astrophysics and Cosmology*, 1973, 237–288, https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0_5.

⁵⁶³ Abhay Ashtekar și Jerzy Lewandowski, „Background Independent Quantum Gravity: A Status Report”, *Classical and Quantum Gravity* 21, nr. 15 (7 august 2004): 21 (15): R53–R152, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/21/15/R01>.

⁵⁶⁴ Penrose, *The Road to Reality*.

⁵⁶⁵ S. W. Hawking și W. Israel, *Quantum Cosmology, in Three Hundred Years of Gravitation* (Cambridge University Press, 1989), 631–651.

⁵⁶⁶ John H. Schwarz, „String Theory: Progress and Problems”, *Progress of Theoretical Physics Supplement* 170 (1 mai 2007): 170: 214–226, <https://doi.org/10.1143/PTPS.170.214>.

3. Gravitația cuantică

Ultimele decenii indică "o estompare a distincției dintre știința fizică și abstractizarea matematică ... [reflectând] o tendință crescătoare de a accepta, iar în unele cazuri de a ignora, probleme grave de testare."⁵⁶⁷ Oldershaw enumeră zeci de probleme majore de netestare în epoca pre-instrumentalistă.

Din punct de vedere metodologic, atât Newton cât și Einstein, și ulterior Dirac, au susținut fără rezerve principiul simplității matematice în descoperirea noilor legi fizice ale naturii. Lor li s-au alăturat și Poincaré și Weyl. "Pentru Dirac, principiul frumuseții matematice a fost parțial o moralitate metodologică și parțial un postulat despre calitățile naturii. El a fost inspirat în mod clar de teoria relativității, de relativitatea generală în special, și de dezvoltarea mecanicii cuantice... considerațiile matematice-estetice ar trebui (uneori) să aibă prioritate față de faptele experimentale și în felul acesta să acționeze ca și criterii ale adevărului."⁵⁶⁸

Eduard Prugovecki afirmă că gravitația cuantică a impus luarea în considerare a unor întrebări epistemologice fundamentale, care pot fi identificate în filosofie cu problema minții-corp și cu problema liberului arbitru.⁵⁶⁹ Aceste întrebări au influențat epistemologia mecanicii cuantice sub forma "paralelismului psiho-fizic" al lui von Neumann⁵⁷⁰ și analiza ulterioară a tezei de către Wigner⁵⁷¹ că "reducerea pachetului de unde" are loc în mintea "observatorului". Gravitația cuantică în cosmologie implică problema libertății experimentatorului de a schimba condițiile fizice locale, un "observator" pasiv. În orice teorie care descrie un singur univers se nasc întrebări cu privire la natura cauzalității în sensul filosofic tradițional.⁵⁷²

⁵⁶⁷ Robert L. Oldershaw, „The new physics—Physical or mathematical science?”, *American Journal of Physics* 56, nr. 12 (1 decembrie 1988): 1076, <https://doi.org/10.1119/1.15749>.

⁵⁶⁸ Helge Kragh, *Dirac: A Scientific Biography*, 1 edition (Cambridge England ; New York: Cambridge University Press, 1990), 277, 284.

⁵⁶⁹ Hermann Weyl și Frank Wilczek, *Philosophy of Mathematics and Natural Science*, Revised ed. edition (Princeton, N.J: Princeton University Press, 2009).

⁵⁷⁰ John Von Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, (Berlin: J. Springer, 1932).

⁵⁷¹ E. P. Wigner et al., „The Scientist Speculates: An Anthology of Partly-baked Ideas”, *American Journal of Physics* 32, nr. 4 (1 aprilie 1964): 168–81, <https://doi.org/10.1119/1.1970298>.

⁵⁷² Mario Bunge, „The Revival of Causality”, în *La Philosophie Contemporaine / Contemporary Philosophy: Chroniques Nouvelles / A New Survey*, ed. Guttorm Fløistad, International Institute of Philosophy / Institut International de Philosophie (Dordrecht: Springer Netherlands, 1982), 133–55, https://doi.org/10.1007/978-94-010-9940-0_6.

O teorie cuantică a gravitației poate fi utilă în unificarea relativității generale cu principiile mecanicii cuantice, dar apar dificultăți în această încercare.⁵⁷³ Teoria rezultată nu este renormalizabilă⁵⁷⁴, și nu poate face predicții fizice semnificative. Dezvoltările ulterioare au dus la teoria corzilor și gravitația cuantică în bucle.⁵⁷⁵ Structura relativității generale ar rezulta din mecanica cuantică a interacțiunii particulelor teoretice fără masă de tip spin-2, numite gravitoni,⁵⁷⁶ deși nu există dovezi concrete ale acestora.

Dilatonul a apărut în teoria lui Kaluza-Klein, o teorie cinci-dimensională care combina gravitația și electromagnetismul, și ulterior în teoria corzilor. Ecuația câmpului care guvernează dilatonul, derivată din geometria diferențială, ar putea fi supusă cuantizării.⁵⁷⁷ Deoarece această teorie poate combina efectele gravitaționale, electromagnetice și cuantice, cuplarea lor ar putea conduce la un mijloc de justificare a teoriei prin cosmologie și experimente.

Cu toate acestea, gravitația este nerenormalizabilă perturbativ.⁵⁷⁸ Teoria trebuie să fie caracterizată printr-o alegere a unor parametri *finit de mulți*, care, în principiu, se pot stabili prin experiment. Dar, în cuantificarea gravitației există, în teoria perturbației, *infinit de mulți parametri independenți* necesari pentru a defini teoria.

Este posibil ca, într-o teorie corectă a gravitației cuantice, parametrii necunoscuți infiniți să se reducă la un număr finit care poate fi apoi măsurat. Una din posibilități este să existe principii de simetrie noi, nedescoperite, care constrâng parametrii și îi reduc la un set finit, o cale urmată de teoria corzilor.

Există mai multe teorii care abordează gravitația cuantică, dar niciuna nu este completă și consistentă. Modelele trebuie să depășească probleme majore formale și

⁵⁷³ A. Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*, 2 edition (Princeton, N.J: Princeton University Press, 2010), 172, 434–435.

⁵⁷⁴ Renormalizarea este o "absorbție" a infinităților prin redefinirea unui număr finit de parametri fizici. Parametrii fizici (masa, sarcina, etc.) au valori perfect finite când sunt observate în experimente reale. În cazul gravitației, teoria perturbativă nu este renormalizabilă. Pentru a renormaliza teoria ar trebui să introducem infinit de mulți "parametri de absorbție", fiecare trebuind să fie determinat prin experiment.

⁵⁷⁵ Penrose, *The Road to Reality*, 1017.

⁵⁷⁶ S. Deser, „Self-Interaction and Gauge Invariance”, *General Relativity and Gravitation* 1, nr. 1 (1 martie 1970): 1: 9–18, <https://doi.org/10.1007/BF00759198>.

⁵⁷⁷ T. Ohta și R. B. Mann, „Canonical reduction of two-dimensional gravity for Particle Dynamics”, *Classical and Quantum Gravity* 13, nr. 9 (1 septembrie 1996): 13 (9): 2585–2602, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/9/022>.

⁵⁷⁸ Richard P Feynman et al., *Feynman Lectures on Gravitation* (Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995), xxxvi–xxxviii; 211–12.

conceptuale, inclusiv formularea de predicții care să poată fi verificate prin teste experimentale.⁵⁷⁹

Teoria corzilor implică obiecte asemănătoare cu corzile se propagă într-un fundal spațiu-timp fix, iar interacțiunile dintre corzile închise dau naștere spațiu-timpului într-un mod dinamic. Aceasta promite să fie o descriere unificată a tuturor particulelor și interacțiunilor.⁵⁸⁰ Unui mod în teoria corzilor îi va corespunde întotdeauna un graviton, dar la această teorie apar caracteristici neobișnuite, precum șase dimensiuni suplimentare ale spațiului. În o evoluție a acestui program, teoria supercorzilor, s-a încercat unificarea teoriei corzilor, a relativității generale și supersimetriei, cunoscute sub denumirea de supergravitație într-un model ipotetic cu unsprezece dimensiuni cunoscut sub numele de teoria-M.⁵⁸¹

Efectele gravitaționale cuantice sunt extrem de slabe, și deci dificil de testat. În ultimii ani fizicienii s-au concentrat pe studierea posibilităților testelor experimentale,⁵⁸² cele mai vizate fiind încălcările invarianței Lorentz, efectele gravitaționale cuantice în fundalul cosmic de microunde, și decoerența indusă de fluctuațiile spațio-temporale.

Teoriile gravitației cuantice sunt afectate de o mulțime de probleme tehnice și conceptuale. Tian Cao susține că gravitatea cuantică oferă o oportunitate unică filosofilor, permițându-le "o șansă bună să vină cu contribuții pozitive, mai degrabă decât să analizeze filosofic ceea ce fizicienii au stabilit deja."⁵⁸³ Carlo Rovelli (arhitectul gravitației cuantice în bucle) îndeamnă filosofi să nu se limiteze la "comentarea și polizarea teoriilor fizice fragmentare actuale, să riște încercând să privească înainte."⁵⁸⁴

Dificultățile conceptuale rezultă în principal din natura interacțiunii gravitaționale, în special echivalența maselor gravitaționale și inerțiale, care permite reprezentarea gravitației ca proprietate a spațiului în sine, mai degrabă decât ca un

⁵⁷⁹ Abhay Ashtekar, „Loop quantum gravity: four recent advances and a dozen frequently asked questions”, în *The Eleventh Marcel Grossmann Meeting* (World Scientific Publishing Company, 2008), 126, https://doi.org/10.1142/9789812834300_0008.

⁵⁸⁰ L. E. Ibanez, „The second string (phenomenology) revolution”, *Classical and Quantum Gravity* 17, nr. 5 (7 martie 2000): 17 (5): 1117–1128, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/17/5/321>.

⁵⁸¹ Townsend, „Four Lectures on M-theory”, 13: 385.

⁵⁸² Sabine Hossenfelder, „Experimental Search for Quantum Gravity”, *arXiv:1010.3420 [gr-qc, physics:hep-ph, physics:hep-th]*, 17 octombrie 2010, cap. 5, <http://arxiv.org/abs/1010.3420>.

⁵⁸³ Tian Yu Cao, „Prerequisites for a Consistent Framework of Quantum Gravity”, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32, nr. 2 (2001): 138.

⁵⁸⁴ Carlo Rovelli, „Halfway Through the Woods: Contemporary Research on Space and Time”, în *The Cosmos of Science*, ed. John Earman și John Norton (University of Pittsburgh Press, 1997), 182.

câmp propagat în spațiu-timp. Când se cuantizează gravitația unele dintre proprietățile spațiu-timpului sunt supuse fluctuațiilor cuantice. Dar teoria cuantică presupune un fundal clasic bine definit pentru aceste fluctuații.⁵⁸⁵

Yoichiro Nambu⁵⁸⁶ a făcut cercetări cu privire la "fizica postmodernă" a gravitației cuantice, a distanțării acesteia de experimente. Există anumite metode de evaluare a teoriei, și constrângeri. Investigarea acestora constituie o problemă de cercetare actuală.⁵⁸⁷ Audretsch⁵⁸⁸ susține că cercetarea cuantică a gravitației contravine paradigmelor lui Kuhn, în gravitația cuantică coexistând mai multe paradigme, ambele bine confirmate și universale. Având în vedere că atât relativitatea generală cât și teoria cuantică pretind a fi teorii universale, orice tensiune conceptuală sau formală dintre ele ar indica faptul că universalitatea unei sau a ambelor teorii este eronată. Peter Galison⁵⁸⁹ susține că constrângerile matematice iau locul, în gravitația cuantică, constrângerilor empirice.

Majoritatea fizicienilor își concentrează atenția asupra teoriei corzilor, dar și gravitația cuantică în bucle este un program activ, ca și alte programe. Este extrem de dificil să se facă predicții concrete în aceste teorii. Teoria corzilor este afectată de lipsa predicțiilor experimentale testabile datorită numărului extrem de mare de stări distincte, și absența principiilor călăuzitoare pentru evidențierea celor semnificative din punct de vedere fizic.⁵⁹⁰ GCB pare a fi mai puțin afectată de lipsa de predicții, discretitudinea operatorilor de arie și de volum reprezintă previziuni concrete ale teoriei, cu consecințe potențial verificabile, făcând teoria mai susceptibilă la falsificare și deci mai științifică decât teoria corzilor.⁵⁹¹ Dar nu este clar cum se pot observa efectiv aceste cantități.

Steven Weinstein și Dean Rickles afirmă că este dificil să se elaboreze un test de observație al unei teorii dacă nu știm unde să privim sau la ce să privim,⁵⁹² datorită și

⁵⁸⁵ Steven Weinstein, „Absolute Quantum Mechanics”, Preprint, 2000, 52: 67–73, <http://philsci-archive.pitt.edu/836/>.

⁵⁸⁶ Y. Nambu, „Directions of Particle Physics”, *Progress of Theoretical Physics Supplement* 85 (1985): 104–110, <https://doi.org/10.1143/PTPS.85.104>.

⁵⁸⁷ Dean Rickles, „A philosopher looks at string dualities”, *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 42 (2011): 42: 54–67, <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.12.005>.

⁵⁸⁸ Audretsch, „Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions”, 12(2): 322–339.

⁵⁸⁹ Peter Galison, *Laws of Nature: Essays on the Philosophic, Scientific, and Historical Dimensions* (Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1995), 369–408.

⁵⁹⁰ Steven Weinstein și Dean Rickles, „Quantum Gravity”, în *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ed. Edward N. Zalta, Winter 2018 (Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018), <https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/quantum-gravity/>.

⁵⁹¹ Lee Smolin, *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*, Reprint edition (Boston u.a: Mariner Books, 2007).

⁵⁹² Brading, Castellani, și Teh, „Symmetry and Symmetry Breaking”.

faptului că majoritatea teoriilor gravitației cuantice par să ia în considerație numai scale energetice foarte mari, de ordinul 10^{19} GeV, fiind nevoie de un accelerator de particule de dimensiuni galactice pentru a se apropia de energiile necesare.

Cel mai notabil "test" al teoriilor cuantice ale gravitației impus de comunitate până în prezent implică un fenomen care nu a fost observat niciodată, așa-numita radiație Hawking din găurile negre. Teoria corzilor și gravitația cuantică în bucle au trecut amândouă testul, folosind grade diferite de libertate microscopice. Erik Curiel⁵⁹³ a argumentat modul în care acest test este folosit ca dovadă în același mod în care dovezile empirice sunt folosite pentru a justifica o teorie obișnuită. Deși rezultatul lui Bekenstein-Hawking nu are statutul de fapt empiric, este o deducere puternică dintr-un cadru care este destul de matur, și anume teoria câmpului cuantic pe un fundal spațio-temporal curbat, putând funcționa ca o constrângere asupra posibilelor teorii.

În gravitația cuantică, este deosebit de important să avem unele constrângeri convenite pentru a ghida construcția, iar o teorie completă a gravitației cuantice ar trebui să reproducă predicțiile teoriei semi-clasice a gravitației ca una din limitele sale posibile.⁵⁹⁴ Curiel pune la îndoială clasarea abordărilor gravitației cuantice în funcție de meritul științific, precum eleganța și coerența, pe care el nu le consideră ca fiind științifice. El afirmă că trebuie ținut cont de potențialul explicativ al teoriilor. Până în prezent niciunul dintre programele principale de cercetare nu a demonstrat că reproduce în mod corespunzător lumea la energii joase. Există indicii că ambele teorii vor depăși această provocare.^{595 596}

Bryce DeWitt a afirmat că câmpul gravitațional ar trebui să fie cuantizat pentru a fi în concordanță cu mecanica cuantică,⁵⁹⁷ pe baza a două premise: argumente logice, și analogia între câmpul electromagnetic și cel gravitațional. Dar Lungimea Planck este atât de mică încât aspecte ale realității care definesc o teorie a gravitației cuantice, precum "apariție", "fenomen" sau "empiric", nu pot fi luate în considerare sub această dimensiune.

⁵⁹³ Erik Curiel, „Against the Excesses of Quantum Gravity: A Plea for Modesty”, *Proceedings of the Philosophy of Science Association* 2001, nr. 3 (2001): 68(3): S424–S441.

⁵⁹⁴ Weinstein și Rickles, „Quantum Gravity”.

⁵⁹⁵ Thomas Thiemann, „The Phoenix Project: Master Constraint Programme for Loop Quantum Gravity”, *Classical and Quantum Gravity* 23, nr. 7 (7 aprilie 2006): 23(7): 2211, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/7/002>.

⁵⁹⁶ Mariana Graña, „The Low Energy Limit of String Theory and Its Compactifications with Background Fluxes”, *Letters in Mathematical Physics* 78, nr. 3 (1 decembrie 2006): 78(3): 279–305, <https://doi.org/10.1007/s11005-006-0125-z>.

⁵⁹⁷ Bryce S. DeWitt, „Definition of Commutators via the Uncertainty Principle”, *Journal of Mathematical Physics* 3 (1 iulie 1962): 619–24, <https://doi.org/10.1063/1.1724265>.

Prima abordare a interpretării teoriei cuantice a fost "instrumentalistă". Jeremy Butterfield și Christopher Isham afirmă că interpretarea teoriei cuantice de la Copenhaga este nu doar ca o interpretare statistică minimală a formalismului cuantic în ceea ce privește frecvența rezultatelor măsurătorilor, ci și ca insistând asupra unui domeniu clasic care, dacă include spațiul și timpul clasic, implică faptul că, vorbind despre "gravitația cuantică", greșim încercând să aplicăm teoria cuantică la ceva ce aparține fundalului clasic al acestei teorii. Trebuie evitată o teorie cuantică a gravitației, dar se poate încerca dezvoltarea unei "teorii cuantice a spațiului și timpului."⁵⁹⁸

Viziunea "literalistă" presupune interpretarea teoriei cuantice "cât se poate de apropiată" de formalismul cuantic. Aceasta implică două versiuni, cea a lui Everett și cea bazată pe logica cuantică. Literalismul lui Everett a fost discutat în legătură cu gravitația cuantică (în special cosmologia cuantică). Scopul lui este de a rezolva "problema de măsurare": când se întâmplă colapsul funcției de undă în raport cu obiectele macroscopice (precum instrumentele).

Teoriile valorilor suplimentare își propun să interpreteze teoria cuantică, în special în problema de măsurare, fără a apela la colapsarea vectorului de stare, prin postularea unor valori suplimentare pentru o anumită "cantitate preferată", împreună cu o regulă pentru evoluția acestor valori. Dar, față de teoria lui Everett, "valori suplimentare" nu implică alte lumi fizice reale; ele doar încearcă să fie mai exacte cu privire la cantitatea preferată și dinamica valorilor sale. Astfel de teorii sunt interpretarea deBroglie-Bohm a "undeii pilot" a teoriei cuantice, și diferitele tipuri de interpretare modale.⁵⁹⁹ Practic, "valorile suplimentare" păstrează dinamica unitară obișnuită (ecuația Schrodinger) a teoriei cuantice, dar adaugă ecuații care descriu evoluția temporală a valorilor sale suplimentare. Interpretarea undeii pilot a fost aplicată doar programului de cercetare al gravitației cuantice bazat pe geometrodinamica cuantică.⁶⁰⁰

Conform lui Jeremy Butterfield și Christopher Isham, dinamica nouă este mai radicală decât "valorile suplimentare". Ea înlocuiește dinamica obișnuită pentru rezolvarea problemei de măsurare prin suprimarea dinamică a suprapunerilor. În ultimii ani dinamica nouă, în special ca urmare a teoriilor de "localizare spontană" ale

⁵⁹⁸ Jeremy Butterfield și Chris Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”, în *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale* (Cambridge University Press, 2001).

⁵⁹⁹ Jeffrey Bub, *Interpreting the Quantum World*, 1st edition (Cambridge: Cambridge University Press, 1999).

⁶⁰⁰ Butterfield și Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”.

lui Ghirardi, Rimini și Weber⁶⁰¹ și Pearle,⁶⁰² s-a dezvoltat considerabil. Penrose a fost deosebit de activ în susținerea acestei idei.

Motivații pentru o teorie a gravitației cuantice, din perspectiva fizicii elementare a particulelor și a teoriei câmpului cuantic:

1. Materia este construită din particule elementare descrise cuantic și care interacționează gravitațional.
2. Teoria câmpului cuantic relativist ar putea avea sens numai prin includerea gravitației.
3. Gravitația cuantică va ajuta la unificarea celor trei forțe non-gravitaționale fundamentale.

Motivații pentru o teorie a gravitației cuantice, din perspectiva relativității generale:

1. Speranța eliminării singularităților prin introducerea efectelor cuantice.
2. Explicarea cuantică a naturii finale a găurilor negre are pierd masă prin radiația Hawking.
3. Gravitatea cuantică poate ajuta la explicarea universului foarte timpuriu, deducând de aici 4-dimensionalitatea spațiu-timpului, și originea evoluției inflaționiste.
4. Se speră că o teorie a gravitației cuantice va oferi o cosmologie cuantică.

J. Butterfield enumeră patru tipuri de abordări în căutarea unei teorii a gravitației:⁶⁰³

1. *Relativitatea generală cuantizată*: se începe cu relativitatea generală la care se aplică un anumit tip de algoritm de cuantificare. Se folosesc în acest scop două tipuri de tehnici: o abordare spațio-temporală 4-dimensională a teoriei câmpului cuantic, și o abordare canonică 3-dimensională pentru spațiul fizic. A fost primul tip de abordare.

⁶⁰¹ G. C. Ghirardi, A. Rimini, și T. Weber, „Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems”, *Physical Review D* 34, nr. 2 (15 iulie 1986): D34:470–491, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470>.

⁶⁰² null Pearle, „Combining Stochastic Dynamical State-Vector Reduction with Spontaneous Localization”, *Physical Review. A, General Physics* 39, nr. 5 (1 martie 1989): A39:2277–2289.

⁶⁰³ Butterfield și Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”.

2. *Relativitatea generală ca limită la energie scăzută a unei cuantificări a unei teorii clasice diferite.* Se aplică un algoritm de cuantificare unei anumite teorii clasice, recuperată ca o limită clasică a noii teorii cuantice. Acest tip de abordare este exemplificat prin principalul program de cercetare actual: teoria supercorzilor. Au existat câteva încercări de a construi și teorii cuantice a topologiei, și a structurile cauzale. .
3. *Relativitatea generală ca limită la energie scăzută a unei teorii cuantice care nu este o cuantificare a unei teorii clasice:* se ia în considerare construirea unei teorii cuantice de la zero fără o referință la o teorie clasică, fără o anumită limită clasică.
4. *Se începe de la zero cu o teorie radical nouă:* se dezvoltă o teorie diferită atât de relativitatea generală cât și de teoria cuantică.

Principiile fundamentale ale relativității generale și ale teoriei cuantice sunt atât de incompatibile încât orice reconciliere va necesita o regândire a categoriilor de spațiu, timp și materie. În prezent, programul dominant este cel al supercorzilor, de tipul al doilea. Gravitația cuantică canonică în abordarea Ashtekar este de primul tip.

Construcția unei teorii a gravitației cuantice este asociată cu două presupuneri: noțiunile clasice de spațiu și timp sunt doar concepte valide aproximativ, care rezultă din natura cuantică "reală" a spațiului și timpului,⁶⁰⁴ și gravitația cuantică va furniza fizica clasică la un nivel mai profund.^{605 606}

Problema de măsurare implică faptul că teoria cuantică nu poate explica, în sine, niciun fenomen clasic - cum ar fi rezultate de măsurare definite cu spațiu bine definit - timp și proprietăți energetice.⁶⁰⁷ Necesitatea relativității generale pentru gravitația cuantică este oarecum analogă cu necesitatea mecanicii clasice pentru mecanica cuantică, rolul relativității generale în primul caz fiind de a specifica domeniul de aplicare al teoriei cuantice. Dar gravitația cuantică poate eluda necesitatea unei teorii clasice prin alegerea unei interpretări diferite a mecanicii cuantice.

⁶⁰⁴ J. Butterfield și C. J. Isham, „On the Emergence of Time in Quantum Gravity”, *arXiv:gr-qc/9901024*, 8 ianuarie 1999, 111–68, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901024>.

⁶⁰⁵ Steven Weinberg, *Dreams Of A Final Theory: The Search for The Fundamental Laws of Nature* (Random House, 2010).

⁶⁰⁶ Max Tegmark și John Archibald Wheeler, „100 Years of the Quantum”, *arXiv:quant-ph/0101077*, 17 ianuarie 2001, 68–75, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101077>.

⁶⁰⁷ Henrik Zinkernagel, „The Philosophy Behind Quantum Gravity”, *Theoria : An International Journal for Theory, History and Foundations of Science* 21, nr. 3 (2010): 295–312.

O primă încercare de a dezvolta o teorie a gravitației cuantice a fost cuplarea TGR și TCC, formând așa-numitele teorii semi-clasice.⁶⁰⁸ În aceste teorii câmpurile de materie sunt structuri teoretice fundamentale cuantice, iar gravitația, adică spațiu-timpul, este fundamental clasică (non-cuantică). Practic, o astfel de teorie rescrie ecuațiile lui Einstein.

În prezent, "gravitația cuantică" este o reconciliere mai substanțială în ceea ce privește cuantizarea gravitației,⁶⁰⁹ construind o teorie cuantică a cărei limită clasică este de acord cu teoria clasică. Cuantizarea nu implică neapărat discretitatea tuturor observabilelor, ca în cazul operatorilor de poziție și impuls. Deci, cuantificarea TGR nu implică discretitatea spațiului.

Potrivit lui Kiefer⁶¹⁰, teoriile de gravitație cuantică pot fi grupate în teorii primare și secundare. Primele folosesc proceduri standard de cuantizare (canonică sau covariantă) precum în cazul electrodinamicii cuantice. A doua include GC ca o limită a unui cadru teoretic cuantic fundamental, de ex. teoria corzilor. De reținut că această clasificare se bazează pe modul în care se desfășoară abordările. Din punct de vedere sistemic, abordările respective pot fi totuși corelate.⁶¹¹

Se speră ca prin gravitația cuantică să se rezolve incompletenta fizicii actuale legată de problema GC, având drept motivații considerații cosmologice, evoluția gaurilor negre, probleme teoretice în TCC și unificarea.^{612 613} Dar nu există nicio necesitate empirică pentru a construi teoria. Ambele teorii (TC și TGR) sunt în perfectă concordanță cu toate datele disponibile. Scala tipică a energiei (sau a lungimii) în care efectele gravitaționale cuantice devin relevante este cu aproximativ 16 ordine de mărime mai mare decât cea actuală.⁶¹⁴ Deci, pragmatic nu putem spera cu adevărat la date experimentale directe.⁶¹⁵

În gravitația cuantică, dimensiunea lungimii Planck este atât de mică încât sugerează că acele aspecte ale realității care necesită o teorie a gravitației cuantice

⁶⁰⁸ S. Carlip, „Is Quantum Gravity Necessary?”, *Classical and Quantum Gravity* 25, nr. 15 (7 august 2008): 154010, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/25/15/154010>.

⁶⁰⁹ Christian Wuthrich, „To quantize or not to quantize: Fact and folklore in quantum gravity”, *Published Article or Volume, Philosophy of Science*, 2005, 777–788, <http://www.jstor.org/stable/10.1086/508946>.

⁶¹⁰ C. Kiefer, „Quantum gravity: general introduction and recent developments”, *Annalen der Physik* 518 (1 ianuarie 2006): 15(12), 129148, <https://doi.org/10.1002/andp.200510175>.

⁶¹¹ Steven Weinberg, „What is Quantum Field Theory, and What Did We Think It Is?”, *arXiv:hep-th/9702027*, 3 februarie 1997, 241–251, <http://arxiv.org/abs/hep-th/9702027>.

⁶¹² Wuthrich, „To quantize or not to quantize”, 777–788.

⁶¹³ Kiefer, „Quantum gravity”, 15(12), 129148.

⁶¹⁴ Nima Arkani-Hamed, „The Future of Fundamental Physics”, 2012, 141(3), 53–66.

⁶¹⁵ Kian Salimkhani, „Quantum Gravity: A Dogma of Unification?”, în *Philosophy of Science. European Studies in Philosophy of Science*, vol 9., ed. Alexander Christian et al. (Cham: Springer, 2018), 23–41.

pentru descrierea lor nu ar trebui să le numim ca, de exemplu, "aspect", "fenomen" sau "empiric". Kantienii afirmă că "apariție" nu este doar ceea ce este practic accesibil, ci orice este localizat în spațiu este o parte a realității empirice. Dar J. Butterfield consideră că este inacceptabil ca aceste scale de lungime, energie etc., fiind atât de mici, există cu adevărat "în principiu."⁶¹⁶ El afirmă că aceste elemente sau aspectele lor localizate nu sunt empirice, deși am putea să le numim în continuare "fizice", și "reale". Dacă se acceptă acest lucru, s-ar putea reconcilia diferitele pretenții kantiene că spațiul și timpul trebuie să aibă anumite caracteristici - de exemplu, continuitate - ca o chestiune *a priori* față de pretențiile acelor programe de gravitație cuantică care neagă spațiul și timpul acelor trăsături. "Contradicția aparentă ar fi un artefact al unei ambiguități în "spațiu și timp": programele de gravitație cuantică nu ar fi despre spațiu și timp în sens kantian."⁶¹⁷

Interpretarea de la Copenhaga poate fi înțeleasă nu doar ca o interpretare statistică minimală a formalismului cuantic pentru frecvența rezultatelor măsurătorilor, ci și ca accentuând asupra unui domeniu clasic din sistemul cuantic, cu o departajare fermă de acesta și o descriere cuantică a primei interpretări. Dacă domeniu clasic include spațiul și timpul clasic, în privința "gravitației cuantice" am greși aplicând teoria cuantică la ceva ce face ține de fundalul clasic a acelei teorii. Pentru a construi o "teorie cuantică a spațiului și timpului" este nevoie de o schimbare radicală a interpretării, eventual și a formalismului matematic, și a teoriei cuantice în sine.⁶¹⁸

O viziune instrumentalistă specifică teoriei cuantice ar trebui sau să nege faptul că starea cuantică descrie sisteme individuale, cel puțin între măsurători (similar, să fie prudentă în descrierea cuantică a acestor sisteme), sau să postuleze un domeniu "non-cuantic" a cărui descriere poate fi luată literal (nu instrumentalist ca în prima condiție), cu domeniul respectiv fiind postulat ca "domeniul clasic" înțeles ca microscopic și/sau domeniul "măsurătorilor" și/sau descris de fizica clasică.⁶¹⁹ Dar aplicațiile recente ale teoriei cuantice fac dificil de îndeplinit aceste condiții. Rezultă că ar trebui să căutăm o interpretare în care niciun rol fundamental nu este atribuit "măsurării", înțeleasă ca o operație exterioară domeniului formalismului.

⁶¹⁶ Butterfield și Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”.

⁶¹⁷ Butterfield și Isham.

⁶¹⁸ Butterfield și Isham.

⁶¹⁹ Butterfield și Isham.

Dacă interpretarea instrumentalistă a teoriei cuantice este "cât se poate de apropiată" de formalismul cuantic ("literalism"), se poate respinge folosirea unor idei precum măsurare, "domeniu clasic" sau "observator extern" cărora se refuză o descriere cuantică-teoretică, căutându-se mai degrabă o potrivire a interpretării cu formalismul.

În prezent se pune întrebarea dacă declarațiile teoretice pot aborda orice subiect dincolo de datele observaționale. Antirealiștii științifici neagă această posibilitate, spre deosebire de realiștii științifici. Realistul științific acordă electronului și quarkului aceeași stare ontologică ca și scaunelor și meselor. Antirealistul consideră conceptele de obiecte invizibile ca simple instrumente tehnice pentru a descrie și prezice fenomene vizibile, utile dar fără o valoare de adevăr. De asemenea, instrumentalistul neagă posibilitatea unor afirmații adevărate despre obiecte teoretice invizibile. Bas van Fraassen consideră un mod mai puțin radical de a respinge realismul științific. Empirismul său constructiv consideră că declarațiile despre obiectele teoretice pot avea în principiu o valoare de adevăr, dar este imposibil să se colecteze suficiente dovezi pentru adevărul oricărei declarații particulare. Richard Dawid afirmă că prin evitarea calității ontologice a afirmației instrumentaliste, empirismul constructiv rămâne la un nivel epistemologic.⁶²⁰

Datorită multitudinii datelor empirice, oamenii de știință trebuie să construiască structuri teoretice care să ajute la manipularea și analiza acestor date. Pot exista mai multe seturi de astfel de structuri teoretice, care concură între ele și se înlocuiesc una pe alta, în timp. Nici măcar elementele esențiale ale teoriilor științifice nu sunt determinate în mod unic de datele empirice (principiul subdeterminării teoriilor științifice prin date experimentale). Deci, nu există declarații științifice care trebuie considerate incontestabile (meta-inducția pesimistă). Teoriile științifice par prea subdeterminate pentru a se potrivi într-o schemă realistă, dar nu sunt suficient de subdeterminate pentru a permite empirismul, fiind dificil de evitat această dilemă.⁶²¹

O generalizare a ipotezei de subdeterminare susținută în mod deosebit de către Quine, susține că nicio descriere teoretică ideală ipotetică, care să acopere în mod consecvent toate datele experimentale posibile, nu ar fi unică. El admite existența unor teorii care au consecințe fenomenologice identice, dar sunt încă "logic incompatibile"

⁶²⁰ Richard Dawid, „Scientific Realism in the Age of String Theory”, *Physics and Philosophy*, 2007.

⁶²¹ Dawid.

datorită seturilor lor incompatibile de obiecte ontologice. Quine este astfel nevoit să distingă între diferite teorii prin mijloace pur conceptuale, și pe baze ontologice.

Richard Dawid consideră că instrumentalismul este cel mai plauzibil în contextul teoriei subdezvoltate, pentru că ascensiunea teoriei poate deschide "noi frontiere ale vizibilului a cărei identificare cu frontierele existenței pare mai puțin plauzibilă decât în cazul clasic", și pentru că "odată ce dezechilibrul dintre efortul teoretic și consecința observațională a devenit prea mare, devine destul de problematic să presupunem că motivațiile sănătoase ale activității fizicianului teoretic se află exclusiv în regimul vizibil."⁶²² Concluzia lui este că fizicienii care lucrează în teoria corzilor nu sunt interesați de experimente pentru predicția fenomenelor vizibile. Teoria lor nu este, deocamdată, capabilă de așa ceva. Dar observarea este o condiție prealabilă necesară pentru atribuirea înțelesului conceptelor și în teoria corzilor. O motivare prin posibile viitoare consecințe vizibile nu pare convingătoare.

Steven Weinstein consideră GC ca o "teorie fizică care descrie interacțiunile gravitaționale ale materiei și energiei în care materia și energia sunt descrise și de teoria cuantică".⁶²³ Multe teorii ale gravitației cuantice sunt cuantizări ale gravitației dar, după cum subliniază Callender și Huggett, aceasta este o alegere empirică, mai degrabă decât una logică.⁶²⁴ În cele din urmă, o cuantificare a gravitației prin TGR sugerează mai mult, în special celor din tabăra canonică de gravitație cuantică (GCC), că o anumită metodă de cuantizare este necesară pentru spațiu.

Una dintre încercările anterioare de reconciliere a cuanticii cu gravitația a apărut în anii 1960 și este cunoscută sub numele de teoria semi-clasică. Deși teoria semi-clasică a fost rapid înțeleasă ca fiind defectă, ea a fost văzută ca un dispozitiv euristic excelent pentru alimentarea problemei gravitației cuantice. Această teorie, alături de alte dileme, cum ar fi dezbateră cuantificării, a determinat necesitatea unor teorii mai robuste despre gravitația cuantică.

Spre deosebire de alte teorii moderne din fizică, în care s-a ajuns la un consens în teorie, gravitația cuantică are un număr de programe de cercetare alternative care dezvoltă o ipoteză de bază prin ipotezele auxiliare. Trei dintre cele mai populare programe de cercetare ale gravitației cuantice pe parcursul istoriei sale scurte includ teoria semi-clasică, teoria corzilor și gravitația cuantică canonică. Dar până acum

⁶²² Dawid.

⁶²³ Weinstein și Rickles, „Quantum Gravity”.

⁶²⁴ Craig Callender și Nick Huggett, *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity* (Cambridge University Press, 2001).

niciuna nu beneficiază de suport experimental. Au fost efectuate câteva experimente, dar toate au fost negative. Experimentele au fost elaborate astfel încât teoria prezice doar ceea ce s-ar putea întâmpla în funcție de un anumit scenariu specific, care nu este singurul posibil, deci nu sunt potențial refutabile.

Data fiind lipsa progresului empiric, în toate abordările gravitației cuantice se recomandă o strategie pluralistă de dezvoltare teoretică. În teoria corzilor există diferite formulări teoretice, sau dualități, fizic echivalente, aspect relevant pentru problema subdeterminării teoriilor prin date. Se argumentează că ar trebui adoptată o perspectivă mai empirică asupra semanticii teoriilor, pentru înțelegerea a ceea ce ne spun teoriile despre spațiu și timp.

În teoria corzilor, spre deosebire de celelalte abordări, există o adevărată unificare a diferitelor forțe, nu doar o descriere cuantică a gravitației, dar unii oameni de știință critică această teorie că folosește prea multe resurse în dauna altor abordări ale gravitației cuantice.

Experimentele de gândire pot fi importante în scopuri euristice, dar în cazul gravitației cuantice concluziile bazate pe experimentele de gândire nu sunt foarte fiabile. Lipsa rezultatelor empirice i-a determinat pe unii oameni de știință și filosofi să afirme că aceste teorii nu sunt cu adevărat științifice.

Simonluca Pinna și Simone Pinna propun un "test conceptual" pentru a evalua dacă conținutul matematic al teoriei gravitației cuantice se referă la un model empiric posibil verificabil.⁶²⁵ Cele mai bune observații empirice sunt cele astrofizice pentru gravitația puternică, astfel încât rămân două opțiuni: (1) elaborarea de noi cadre experimentale adecvate,⁶²⁶ și (2) posibilitatea înlocuirii criteriilor standard de verificare științifică cu cele mai puțin reglementate empiric.⁶²⁷ Există două opinii puse ale oamenilor de știință: cei care consideră că spațiu-timpul nu este o structură fizică fundamentală,⁶²⁸ și cei care îl consideră fundamental în orice domeniu fizic⁶²⁹ care

⁶²⁵ S. Pinna și Simone Pinna, „A Conceptual Test for Cognitively Coherent Quantum Gravity Models”, 2017, <https://doi.org/10.3390/technologies5030051>.

⁶²⁶ Sabine Hossenfelder și Lee Smolin, „Phenomenological Quantum Gravity”, *arXiv:0911.2761 [gr-qc, physics:physics]*, 14 noiembrie 2009, 66, 99–102, <http://arxiv.org/abs/0911.2761>.

⁶²⁷ Richard Dawid, *String Theory and the Scientific Method*, 1 edition (Cambridge: Cambridge University Press, 2013).

⁶²⁸ Carlo Rovelli, „Quantum Gravity”, Cambridge Core, noiembrie 2004, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511755804>.

⁶²⁹ Amit Hagar și Meir Hemmo, „The Primacy of Geometry”, ResearchGate, 2013, 44, 357–364, https://www.researchgate.net/publication/259158226_The_primacy_of_geometry.

presupun abordarea conservatoare epistemologică exprimată de (1). Cei care susțin dispariția spațiu-timpului spațial par să urmeze perspectiva, (2).

Unii metodologi afirmă că teza dispariției spațiu-timpului la energii înalte impune o schimbare a criteriilor de verificare științifică, pentru a adapta coerența empirică la aceste teze în gravitația cuantică. Aceasta ar implica modificări în conceptele de "observator" și legătura sa cu observațiile și măsurătorile.

Geometrodinamica⁶³⁰ a fost prima încercare de cuantificare a gravitației pornind de la formularea canonică (hamiltoniană) a teoriei generale a relativității interpretată ca o teorie independentă de fundal.⁶³¹ Ulterior, adepții gravitației cuantice în bucle (GCB), o abordare canonică, afirmă că spațiu-timpul relativist dispare la limita energiei ridicate. Aceasta ar putea implica inexistența unui cadru spațio-temporal.⁶³² Există suspiciuni privind dispariția spațiu-timpului și în alte abordări,⁶³³ inclusiv în teoria corzilor care în general este interpretată ca dependentă de fundal.

Hagar și Hemmo declară nevoia unui anumit tip de spațiu-timp chiar și la nivelul GC; fizica nu este formată doar din teorii dinamice, ci și din experimente și măsurători prin care trebuie testate modelele. Deci, trebuie să existe ceva observabil cu caracteristici geometrice sau care pot fi traduse în termeni geometrici.⁶³⁴ Aceștia afirmă că interpretarea teoriilor GC ca teorii fără spațiu ar fi în contradicție cu bazele epistemice ale fizicii experimentale, respectiv cu primatul observațiilor și măsurătorilor geometrice.

Suporterii dispariției spațiu-timpului urmăresc o abordare leibniziană, conform lui Earman, chiar pitagoreică, a realității, conform căreia sensul realității fizice se poate deriva direct din teoria matematică cu ajutorul unor criterii *a priori* mai "rezonabile."⁶³⁵ Perspectiva operaționalistă definește realitatea fizică față de măsurabilitatea ei, respectiv orice concept este "nimic mai mult decât un set de operațiuni, conceptul este sinonim cu setul corespunzător de operații."⁶³⁶ Detectarea

⁶³⁰ Karel Kuchar, „Canonical Quantum Gravity”, *arXiv:gr-qc/9304012*, 8 aprilie 1993, 119–150, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9304012>.

⁶³¹ C. Kiefer, „Time in Quantum Gravity”, în *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, ed. Craig Callender (Oxford University Press, 2011), 663–678.

⁶³² Carlo Rovelli, „The Disappearance of Space and Time”, în *The Disappearance of Space and Time*, ed. Dennis Dieks (Elsevier, 2007), 25–36.

⁶³³ Nick Huggett, Tiziana Vistarini, și Christian Wuthrich, „Time in quantum gravity”, *arXiv:1207.1635 [gr-qc, physics:physics]*, 3 iulie 2012, 242–261, <http://arxiv.org/abs/1207.1635>.

⁶³⁴ Hagar și Hemmo, „The Primacy of Geometry”, 44, 357–364.

⁶³⁵ John Earman, „Thoroughly Modern McTaggart: Or, What McTaggart Would Have Said If He Had Read the General Theory of Relativity”, *Philosophers' Imprint* 2 (2002): 2, 1–28.

⁶³⁶ Richard Feldman, „Naturalized Epistemology”, 5 iulie 2001, 5, <https://plato.stanford.edu/archives/sum2012/entries/epistemology-naturalized/>.

cantităților măsurabile în gravitația cuantică este scopul principal al experimentatorilor, întrucât măsurabilitatea este o caracteristică esențială pentru identificarea mărimilor relevante din punct de vedere fizic.

Încă nu s-a reușit includerea gravitației în cadrul teoretic al câmpului cuantic al modelului standard, deoarece interacțiunile gravitaționale nu satisfac principiile renormalizabilității.

3.1 Euristicele gravitației cuantice

În încercarea de dezvoltare a unei teorii solide a gravitației cuantice, au existat mai multe programe de cercetare, dintre care unele au căzut în timp în desuetitudine datorită puterii euristice mai mari a altor programe. J. Butterfield distinge astfel trei mari programe de cercetare:⁶³⁷

Programul particulelor stabilește ca entitate de bază *gravitonul*, cuanta câmpului gravitațional. Gravitonul se propagă într-un spațiu-timp Minkowski și este asociat cu o reprezentare specifică a grupului Poincare prin masa zero și spinul 0 sau 2. Dar acest program prezintă foarte multe disfuncționalități conceptuale.

Programul superstructurilor, o abordare motivată de succesul trecerii de la vechea teorie non-renormalizabilă a interacțiunilor slabe la noua unificare renormalizabilă a forțelor slabe și electromagnetice găsite de Salam, Glashow și Weinberg. Ideea a fost adăugarea de câmpuri de materie din relativitatea generală pentru a anula problema UV. Așa a apărut teoria supergravitației care, după unele succese minore, s-a ajuns la concluzia că nu rezolvă divergențele, dar linia sa de gândire este continuată în prezent de teoria supercorzilor, care este programul de cercetare dominant în gravitația cuantică. Programul încă nu a ajuns la maturitate. Din punctul de vedere al răspunsului oferit la aspectele conceptuale, programul supercorzilor este similar în multe privințe cu programul particulelor.

Programul gravitației cuantice canonice a început cu teoria Wheeler-DeWitt. Ulterior a apărut programul lui Ashtekar care utilizează ecuația Wheeler-DeWitt,⁶³⁸ cu ajutorul unui set de variabile canonice care produc o simplificare a structurii funcțiilor de constrângere centrală, fiind și în prezent un program foarte activ, cu evoluții impresionante în ultimii ani.

⁶³⁷ Butterfield și Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”.

⁶³⁸ Bryce S. DeWitt, „Quantum Theory of Gravity. I. The Canonical Theory”, *Physical Review* 160, nr. 5 (25 august 1967): 160 (5): 1113–1148, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.160.1113>.

Toate cele trei programe sunt similare în sensul că principala modalitate în care acestea depășesc tratamentul comun al spațiu-timpului este prin cuantificarea unei cantități care este un tip standard de variabilă din fizica clasică.

Există trei probleme majore în conceperea unei teorii a gravitației cuantice: atât teoria cuantică cât și relativitatea generală prezintă probleme conceptuale semnificative în sine, bazele fundamentale disparate ale celor două teorii generează noi probleme majore atunci când se încearcă combinarea lor, și contrastul dintre lipsa unei teorii satisfăcătoare a gravitației cuantice și a teoriilor ingredientelor de succes ridică întrebări cu privire la natura și funcția discuției filosofice a gravitației cuantice.

Potrivit lui Laudan, teoria preferată este cea care maximizează succesele empirice, reducând în același timp pasivele conceptuale, iar tradiția preferată de cercetare este aceea care sprijină cele mai reușite teorii.

Conform lui Péter Szegedi, istoria interpretărilor din mecanica cuantică se potrivesc foarte bine metodologiei lui Lakatos a programelor de cercetare științifică rivale, față de Kuhn care nu permite existența simultană a diferitelor paradigme rivale.⁶³⁹ ⁶⁴⁰ Rezultă că dezvoltarea mecanicii cuantice în sine este o dezvoltare, o evoluție a problemelor progresive, dacă este progresivă atât teoretic, cât și empiric. Interpretările mecanicii cuantice se pot aranja ca o serie de teorii, rezultând o progresivitate teoretică, dar progresivitatea empirică este dificil de evaluat. Astfel, conform criteriilor, programele interpretative pot fi științifice, dar degenerative, respectiv sunt caracterizate de stagnare. Evaluarea se poate schimba în viitor, fiind vorba de un program pe termen lung: "Mai mult decât atât, uneori se întâmplă ca, atunci când un program de cercetare ajunge într-o fază degeneratoare, o mică revoluție sau o schimbare creativă a euristicii sale pozitive o poate împinge din nou înainte."⁶⁴¹

Există posibilitatea ca un program degenerat să fie revigorat, sau chiar să fie considerat de succes dacă oferă rezultate utile pentru alte programe.⁶⁴²

⁶³⁹ Péter Szegedi, „Lakatos On Crucial Experiments And The History Of Interpretations Of Quantum Mechanics”, în *Appraising Lakatos: Mathematics, Methodology and the Man*, ed. G. Kampis, L. : Kvasz, și M. Stöltzner (Kluwer Academic Publishers, 2002), 1–101.

⁶⁴⁰ Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 33–34.

⁶⁴¹ Lakatos, 51.

⁶⁴² H. Zandvoort, Paul Weingartner, și *Methodology and Philosophy of Science International Congress of Logic, Intrinsic Success and Extrinsic Success of Research Programs, in 7th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science: Salzburg, July 11th-16th, 1983 Vol. 4, Vol. 4*, (Salzburg: Huttegger, 1983), 289–92.

Péter Szegedi distinge, în cazul diverselor interpretări cuantice, un nucleu dur și o euristică adaptându-se la problemele apărute.⁶⁴³ Astfel în programul lui Louis de Broglie, sinteza imaginilor undă-particulă este nucleul dur, în timp ce formele reale ale realizării în ordinea apariției (euristica pozitivă) sunt următoarele: principiul soluției duble, teoria undelor pilot, ipoteza non-liniarității și termodinamica ascunsă. În cazul lui David Bohm, nucleul dur este teoria variabilelor ascunse și potențialul cuantic, la care a adăugat la un moment dat ipoteza stochasticității. Vigier a folosit același nucleu dur, dar cu o presupunere suplimentară a ipotezei privind gradele ascunse de libertate. Există și alte programe în interpretările mecanicii cuantice. În programul de cercetare Fényes-Nelson-de la Peña, stochasticitatea nu este o ipoteză suplimentară, ci un nucleu dur, unde euristica pozitivă a impus utilizarea inițială a proceselor de difuzie, apoi mișcarea Browniană și, în final, electrodinamica stocastică. Euristica pozitivă a acestor programe este diferită, dar în general se folosesc de abordarea relativistă, principiul determinismului sau cauzalității și principiul unității naturii. În interpretarea ortodoxă, conform lui Cushing, nucleul dur constă din relațiile canonice de comutare și ecuațiile de mișcare ale lui Hamilton, iar euristica pozitivă se aplică formelor clasice ale hamiltonienilor pentru sisteme specifice, principiul corespondenței și principiul observabilelor; ca ipoteză auxiliară a fost folosit raportul operatori-observatori. Lakatos afirmă despre acest program:

"În noua teorie cuantică post-1925, poziția" anarhistă "a devenit dominantă și fizica cuantică modernă, în interpretarea sa de la Copenhaga, a devenit unul dintre principalii purtători standard ai obscurantismului filosofic. În noua teorie, principiul "complementarității" a încorporat inconsecvența [slabă] ca o caracteristică fundamentală de bază a naturii și a îmbinat pozitivismul subiectivist și filosofia dialectică antilogică și chiar limbajul obișnuit într-o singură alianță nesănătoasă. După 1925, Bohr și asociații lui au introdus o scădere nouă și fără precedent a standardelor critice pentru teoriile științifice. a condus la o înfrângere a rațiunii în fizica modernă și la un cult anarhist de haos incomprehensibil."⁶⁴⁴

Experimentele cruciale în sensul lui Lakatos în mecanica cuantică încep cu un experiment *gedanken*, experimentul Einstein-Podolsky-Rosen.⁶⁴⁵ Comentatorii disting (cel puțin) cinci ipoteze aici: principiul realismului, valabilitatea formalismului mecanic cuantic, ipoteza de completitudine, principiul separabilității, și validitatea

⁶⁴³ Szegedi, „Lakatos On Crucial Experiments And The History Of Interpretations Of Quantum Mechanics”.

⁶⁴⁴ Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 59–60.

⁶⁴⁵ A. Einstein, B. Podolsky, și N. Rosen, „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?”, *Physical Review* 47, nr. 10 (15 mai 1935): 770–80, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>.

logicii clasice. Conform argumentului EPR, una dintre cele cinci ipoteze este falsă. Următorul pas a fost făcut de Bohm, care a reformulat experimentul gedanken cu spini,⁶⁴⁶ dar fără să pară încă un experiment crucial întrucât nu s-a afirmat că diferitele teorii oferă rezultate diferite ale măsurătorilor.

Lucrarea lui John Bell a oferit o speranță că este posibilă testarea experimentală a interpretărilor,⁶⁴⁷ subliniind că trebuie să existe diferențe între predicțiile mecanice cuantice și cele ascunse. El presupunea că într-un experiment real putem măsura probabilitățile. Inegalitatea Bell s-a apropiat și mai mult de condițiile reale ale unui experiment ușor de gestionat.

3.2 Teste ale gravitației cuantice

Testul primordial al oricărei teorii cuantice a gravitației este reproducerea succeselor relativității generale. Aceasta implică reconstrucția geometriei locale din observabilele nelocale. În plus, gravitația cuantică ar trebui să prezică probabilistic topologia la scară largă a Universului, care în curând poate fi măsurabilă,⁶⁴⁸ și fenomene la scala Planck.⁶⁴⁹

Există deja o predicție care ține de gravitația cuantică: existența și spectrul radiației Hawking a găurii negre, o predicție "semiclastică" rezultată din teoria câmpului cuantic pe un fundal curbat fix, și confirmată ulterior teoretic.⁶⁵⁰ Se presupune că o teorie a gravitației care nu va reproduce această predicție este greșită.

Pentru scara la nivelul energiei Planck au fost propuse mai multe teste bazate pe două idei: că putem detecta abateri foarte mici de simetrii exacte, și că putem să integrăm pe distanțe sau timpi mari pentru a observa efecte colective foarte mici. Aceste propuneri rămân extrem de speculative, dar sunt plauzibile.⁶⁵¹ Unele dintre

⁶⁴⁶ Bohm, *Quantum Theory*.

⁶⁴⁷ J. S. Bell, „On the Einstein Podolsky Rosen paradox”, *Physics Physique Fizika* 1, nr. 3 (1 noiembrie 1964): 447, <https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>.

⁶⁴⁸ Neil Cornish, David Spergel, și Glenn Starkman, „Circles in the Sky: Finding Topology with the Microwave Background Radiation”, *Classical and Quantum Gravity* 15, nr. 9 (1 septembrie 1998): 15, 2657, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/15/9/013>.

⁶⁴⁹ Richard Easther et al., „Inflation as a Probe of Short Distance Physics”, *Physical Review D* 64, nr. 10 (16 octombrie 2001): 103502, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.103502>.

⁶⁵⁰ Fay Dowker et al., „Pair Creation of Dilaton Black Holes”, *Physical Review D* 49, nr. 6 (15 martie 1994): 2909, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.49.2909>.

⁶⁵¹ Carlip, „Quantum Gravity”.

aceste idei pot fi găsite în Giovanni Amelino-Camelia, *Are we at the dawn of quantum-gravity phenomenology*:⁶⁵²

- Încălcări ale principiului echivalenței.⁶⁵³ S-ar putea dezvolta teste de precizie ale principiului de echivalență prin interferometria atomică și neutronică.
- Încălcări ale invarianței CPT, de exemplu prin formarea găurilor negre virtuale.⁶⁵⁴ Limitele experimentale actuale se apropie de nivelul de observare al acestor efecte.⁶⁵⁵ Pot apare și încălcări ale altor simetrii globale, precum CP, cu consecințe observabile la scala Planck.⁶⁵⁶
- Distorsiuni ale relațiilor de dispersie pentru lumină și neutrinii pe distanțe lungi, rezultând o viteză a luminii dependentă de frecvență.⁶⁵⁷ Se poate observa prin observarea razelor gama, limitele experimentale actuale sunt aproape de nivelul de observare. Dacă efectul depinde de polarizare, testele birefringenței induse de gravitație pot fi în limite de observație.⁶⁵⁸
- Interferometrele pentru detectarea undelor gravitaționale ar putea observa fluctuațiile cuantice testabile în geometria spațiului,⁶⁵⁹ o idee încă controversată.
- Gravitația cuantică în apropierea masei Planck afectează fluxurile grupului de renormalizare și constantele de cuplare a energiei joase în teoriile mari unificate,⁶⁶⁰ dar acest efect este mai degrabă un dezavantaj făcând mai dificile alte posibile teste.

⁶⁵² Giovanni Amelino-Camelia, „Are we at the dawn of quantum-gravity phenomenology?”, *arXiv:gr-qc/9910089*, 25 octombrie 1999, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9910089>.

⁶⁵³ G. Z. Adunas, E. Rodriguez-Milla, și D. V. Ahluwalia, „Probing Quantum Aspects of Gravity”, *Physics Letters B* 485, nr. 1–3 (iulie 2000): 215, [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(00\)00697-3](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(00)00697-3).

⁶⁵⁴ Alan Kostelecky și Rob Potting, „Expectation Values, Lorentz Invariance, and CPT in the Open Bosonic String”, *Physics Letters B* 381, nr. 1–3 (iulie 1996): 89, [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(96\)00589-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00589-8).

⁶⁵⁵ R. Adler et al., „Test of CPT Symmetry and Quantum Mechanics with Experimental data from CPLEAR”, *Physics Letters B* 364, nr. 4 (decembrie 1995): 239, [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(95\)01416-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(95)01416-0).

⁶⁵⁶ Renata Kallosh et al., „Gravity and global symmetries”, *Physical Review D* 52, nr. 2 (15 iulie 1995): 912, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.912>.

⁶⁵⁷ Jorge Alfaro, Hugo A. Morales-Tecotl, și Luis F. Urrutia, „Quantum gravity corrections to neutrino propagation”, *Physical Review Letters* 84, nr. 11 (13 martie 2000): 2318, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.2318>.

⁶⁵⁸ Reinaldo J. Gleiser și Carlos N. Kozameh, „Astrophysical limits on quantum gravity motivated birefringence”, *Physical Review D* 64, nr. 8 (septembrie 2001): 083007, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.083007>.

⁶⁵⁹ Y. Jack Ng și H. van Dam, „Measuring the foaminess of space-time with gravity-wave interferometers”, *Foundations of Physics* 30, nr. 5 (2000): 795, <https://doi.org/10.1023/A:1003745212871>.

⁶⁶⁰ L. J. Hall și U. Sarid, „Gravitational Smearing of Minimal Supersymmetric Unification Predictions”, *Physical Review Letters* 70, nr. 18 (3 mai 1993): 2673, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.2673>.

- Utilizarea laserelor puternice pentru observarea (indirectă) a radiației Unruh, contrapartida radiației Hawking pentru o particulă de accelerare.⁶⁶¹ Acesta poate fi cel puțin un test al predicțiilor teoretice de câmp cuantic din gravitația cuantică.
- Un test indirect din analogii ale materiei condensate cu găurile negre, care ar trebui să emită fononi prin "radiații Hawking" din orizonturile sonice.⁶⁶² Testele pot fi posibile în viitor în condensatele Bose-Einstein,⁶⁶³ heliul superfluid 3⁶⁶⁴ și "lumina lentă" în dielectrice.⁶⁶⁵

Aceste experimente nu vor diferenția între modele specifice de gravitație cuantică, întrucât actualele modele nu pot încă să facă predicții suficient de clare, dar se pot testa fenomenele la scala Planck afectate de gravitația cuantică. În ultimul timp fizicienii s-au concentrat pe ideea testelor experimentale pentru o anumită clasă de modele de gravitație cuantică, "gravitația la scala TeV" sau "lumea membranelor",⁶⁶⁶ care postulează dimensiuni suplimentare "mari", de un milimetru.

Problema modului în care măsurarea afectează starea ontologică a sistemului observat este numită *problema de măsurare*. Măsurarea în mecanica cuantică este privită în moduri diferite în diverse interpretări. În mecanica clasică, un sistem simplu punctual este descris pe deplin de poziția și impulsul particulei. În mecanica cuantică, un sistem este descris de starea lui cuantică, prin probabilitățile posibilelor poziții și impulsuri. Valorile prezise ale măsurătorilor sunt descrise printr-o distribuție a probabilității sau o "medie" (sau "așteptare") a operatorului de măsurare pe baza stării cuantice a sistemului pregătit. Procesul de măsurare este adesea considerat aleatoriu și indeterminist în unele interpretări, în timp ce în alte interpretări indeterminismul este fundamental și ireductibil.

⁶⁶¹ Pisin Chen și Toshi Tajima, „Testing Unruh Radiation with Ultraintense Lasers”, *Physical Review Letters* 83, nr. 2 (12 iulie 1999): 256, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.256>.

⁶⁶² Matt Visser, „Acoustic black holes”, *arXiv:gr-qc/9901047*, 15 ianuarie 1999, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901047>.

⁶⁶³ L. J. Garay et al., „Sonic analog of gravitational black holes in Bose-Einstein condensates”, *Physical Review Letters* 85, nr. 22 (27 noiembrie 2000): 4643, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.4643>.

⁶⁶⁴ G. E. Volovik, „Field theory in superfluid 3He: What are the lessons for particle physics, gravity and high-temperature superconductivity?”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96, nr. 11 (25 mai 1999): 6042, <https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.6042>.

⁶⁶⁵ U. Leonhardt și P. Piwnicki, „Relativistic Effects of Light in Moving Media with Extremely Low Group Velocity”, *Physical Review Letters* 84, nr. 5 (31 ianuarie 2000): 822, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.822>.

⁶⁶⁶ Lisa Randall și Raman Sundrum, „A Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension”, *Physical Review Letters* 83, nr. 17 (25 octombrie 1999): 3370, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.3370>.

Există câteva modalități posibile de a descrie matematic procesul de măsurare (atât distribuția de probabilități, cât și funcția de undă colapsată). Descrierea cea mai convenabilă depinde de spectrul (adică de setul de valori proprii) observabilei.

Cea mai evidentă particularitate în gravitația cuantică este lipsa de date (nu există fenomene care să poată fi identificate fără echivoc ca urmare a unei interacțiuni dintre relativitatea generală și teoria cuantică). Aceasta se datorează faptului că scala gravitației cuantice (lungimea Planck) este extrem de mică, la fel și energia Planck și timpul Planck. Rezultă că singurul regim fizic în care efectele gravitației cuantice ar putea fi studiate direct este în epoca imediată de după Big Bang, pe lângă problemele legate de interacțiunea gravitonilor de spin-2 cu un tensor conservat de energie-impuls. Rezultă că teoriile de gravitație cuantică diferite ar putea fi verificate empiric doar la energii foarte mari.

Pentru fizică, aceasta înseamnă că este foarte dificil să se construiască o teorie pe deplin satisfăcătoare. Din punct de vedere filosofic, dificultatea se datorează problemelor conceptuale despre spațiu, timp și materie, dar și dificultăți datorită construcției teoretice întrucât nu există niciun acord asupra tipurilor de date pe care le-ar obține o teorie cuantică a gravitației. În această situație, J. Butterfield afirmă că construcția teoretică ajunge să fie mult mai puternic influențată de considerente teoretice, bazându-se pe diferitele opinii prima facie despre cum ar trebui să arate teoria, întemeiate parțial pe prejudecățile filosofice ale cercetătorului și pe tehnicile matematice considerate de succes. Astfel, un program de cercetare tinde spre construirea schemelor teoretice abstracte compatibile cu un cadru conceptual preconcept și coerente intern într-un sens matematic, rezultând o "subdeterminare a teoriei prin date". Mai mult, programul tinde să producă scheme bazate pe o gamă largă de motivații filosofice, care ar putea fi presupuse a fi proiecții inconștiente ale psihicului cercetătorului individual, și ar putea fi respinse ca atare.

Este important de determinat dacă există efecte ale gravitației cuantice măsurabile sub limitele Planck, eventual rezultând dintr-un efect non-perturbativ. Dar însăși existența unor astfel de efecte, și fenomenele pe care le prezic, sunt ele însele probabil puternic dependente de teorie. Rezultă că subiectul gravitației cuantice prezintă filosofului o gamă largă și variată de abordări, în condițiile în care în gravitația cuantică nu există teorii suficient de bine definite, nici măcar bine stabilite.

Din analizele dimensionale ar rezulta că gravitația cuantică necesită experimental energii mari, de nivelul energiei Planck. Pentru aceasta ar fi nevoie de un

accelerator de particule mai mare decât galaxia noastră, și deci testele directe ale gravitației cuantice par imposibile conform acestor calcule. Rezultă că testele de laborator de înaltă precizie în câmp slab vor fi singura posibilitate de a face din gravitația cuantică o teorie fizică testabilă/falsificabilă. Aceasta ar fi posibil în sistemele macroscopice care încă respectă legile teoriei cuantice - cele descrise de funcțiile de undă macroscopice. Acestea ar permite măsurarea, de exemplu, a energiilor de excitație gravitațională cuantică.⁶⁶⁷ Johan Hansson și Stephane Francois sugerează posibilitatea de a testa teoriile gravitației cuantice folosind sisteme cuantice macroscopice; heliul superfluid, condensatele gazoase Bose-Einstein și moleculele "macroscopice" care încă se supun mecanicii cuantice, și stelele neutronice. Efectele gravitației cuantice, definite aici ca interacțiuni gravitaționale observabile între obiecte cuantice, ar trebui să fie observate folosind tehnologia existentă, permițând o falsificabilitate la energie scăzută în regimul de câmp slab.⁶⁶⁸

Roberto Balbinot și Alessandro Fabbri, în *Amplificarea semnalului Hawking în BEC*,⁶⁶⁹ propun modele simple ale condensatelor Bose-Einstein pentru a studia efectele analogice de creare a perechilor, și anume, efectul Hawking din găurile negre acustice și efectul dinamic Casimir. Ideea constă din reproducerea într-un context al materiei condensate a unor efecte cuantice prezise de teoria câmpului cuantic în spațiul curbat, inclusiv emisia termică a găurilor negre prezise de Hawking în 1974.⁶⁷⁰ Concluzia autorilor acestui experiment este că au obținut unele rezultate care ar putea fi utile în cercetarea experimentală viitoare.

Formalismul The se bazează pe forma lagrangianului care reglementează dinamica particulelor punctuale cu masă și sarcină și câmpul electromagnetic într-un câmp gravitațional static, sferic simetric descris de potențialele gravitaționale fenomenologice T, H, e. Această teorie a fost utilizată pentru a interpreta rezultatele testelor experimentale ale PPE.⁶⁷¹

⁶⁶⁷ Johan Hansson, „Aspects of nonrelativistic quantum gravity”, *arXiv:0910.4289 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-ph, physics:quant-ph]*, 22 octombrie 2009, 707 (2009), <http://arxiv.org/abs/0910.4289>.

⁶⁶⁸ Johan Hansson și Stephane Francois, „Testing Quantum Gravity”, *International Journal of Modern Physics D* 26, nr. 12 (octombrie 2017): 1743003, <https://doi.org/10.1142/S0218271817430039>.

⁶⁶⁹ Roberto Balbinot și Alessandro Fabbri, „Amplifying the Hawking signal in BECs”, *Advances in High Energy Physics* 2014 (2014): 1–8, <https://doi.org/10.1155/2014/713574>.

⁶⁷⁰ S. W. Hawking, „Particle Creation by Black Holes”, *Communications in Mathematical Physics* 43, nr. 3 (1 august 1975): 199–220, <https://doi.org/10.1007/BF02345020>.

⁶⁷¹ J. E. Horvath et al., „Einstein equivalence principle and theories of gravitation: A gravitationally modified standard model”, *Physical Review D* 38, nr. 6 (15 septembrie 1988): 1754, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.38.1754>.

Formalismul *xg* introdus de W.-T. Ni⁶⁷² a oferit inițial un cadru pentru analiza fizicii electrodinamice într-un câmp gravitațional de fond, extins apoi pentru a acoperi alte sectoare ale modelului standard.

Formalismul Kosteletsky, dezvoltat de Colladay și Kosteletsky, se folosește pentru tratarea posibilității de defalcare spontană a simetriei Lorentz în contextul teoriei corzilor.⁶⁷³

Un formalism bazat pe formele ecuațiilor de mișcare are avantajul de a aborda direct unele cerințe naturale.

3.3 Gravitația cuantică canonică

În interpretarea GCC, gravitația apare ca o pseudoforță geometrică, este redusă la geometria spațio-temporală și devine un simplu efect al curburii spațiu-timpului.⁶⁷⁴ (Maudlin⁶⁷⁵). Lehmkuhl⁶⁷⁶ susține că formalismul canonic nu confirmă această interpretare. TGR asociază gravitația cu spațiu-timpul, dar tipul de asociere nu este fixat.⁶⁷⁷ În locul interpretării geometrice se poate folosi interpretarea câmpului (geometria spațiu-timp este redusă la un câmp gravitațional, respectiv metrica, considerată drept "doar un alt câmp") sau interpretarea egalitară (o identificare conceptuală a gravitației și spațiu-timpului în TGR.⁶⁷⁸). Aceste interpretări alternative reduc diferențele conceptuale dintre TGR și celelalte teorii ale câmpului.

Instrumentalismul permite ignorarea gravitației cuantice, întrucât concepe teoriile științifice doar ca instrumente de predicție. Gravitația canonică cuantică urmărește o teorie cuantică nonperturbantă a câmpului gravitațional. Ea se bazează pe consistența între mecanica cuantică și gravitație, fără a încerca să unifice toate câmpurile. Ideea principală este aplicarea unor proceduri standard de cuantificare la teoria generală a relativității. Pentru aceasta, este necesar ca relativitatea generală să fie exprimată în formă canonică (hamiltoniană) și apoi se cuantizează în mod obișnuit.

⁶⁷² W.-T. Ni, „Equivalence principles and electromagnetism”, *Physical Review Letters* 38 (1 februarie 1977): 301, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.38.301>.

⁶⁷³ Don Colladay și Alan Kosteletsky, „Lorentz-Violating Extension of the Standard Model”, *Physical Review D* 58, nr. 11 (26 octombrie 1998): 6760, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.58.116002>.

⁶⁷⁴ Salimkhani, „Quantum Gravity”.

⁶⁷⁵ Tim Maudlin, „On the Unification of Physics”, *Journal of Philosophy* 93, nr. 3 (1996): 129–144.

⁶⁷⁶ D. Lehmkuhl, D. Dieks, și M. Redei, „Is spacetime a gravitational field?”, in *The Ontology of Spacetime II*, Volume 4 - 1st Edition”, 2008, 83–110, <https://www.elsevier.com/books/the-ontology-of-spacetime-ii/dieks/978-0-444-53275-6>.

⁶⁷⁷ Lehmkuhl, Dieks, și Redei, 84.

⁶⁷⁸ Lehmkuhl, Dieks, și Redei, 84.

Acest lucru a fost (parțial) realizat cu succes de Dirac⁶⁷⁹ și (diferit) de Arnowitt, Deser și Misner.⁶⁸⁰

3.3.1 Teste propuse pentru GCC

Carlip afirmă, cu referire la gravitația cuantică: "Măsura supremă a oricărei teorii este acordul său cu Natura; dacă nu avem astfel de teste, cum vom ști dacă avem dreptate?"⁶⁸¹ De obicei, o nouă teorie se construiește cu ajutorul datelor experimentale disponibile, la care se încearcă să se potrivească modelele fenomenologice, verificându-se apoi prin predicții. Adesea, consistența conceptuală și formală este ocolită în încercarea de a se potrivi cu realitatea. La gravitația cuantică totul se petrece în mod foarte diferit: ea se bazează aproape în întregime pe consistența conceptuală și formală, împreună cu constrângerile impuse, și pare imposibil de abordat prin cercetarea experimentală. Dean Rickles afirmă că testul de bază al oricărei teorii științifice este un test experimental, fără de care teoria se încurcă în matematică pură sau, mai rău, în metafizică.⁶⁸²

Giovanni Amelino-Camelia a inițiat un nou program de cercetare denumit "fenomenologie gravitațională cuantică", prin care încearcă să transforme cercetarea cuantică a gravitației într-o adevărată disciplină experimentală. Scara la care apar efecte gravitaționale cuantice este stabilită de diferitele constante fizice ale fizicii fundamentale: h , c și G , care caracterizează fenomenele cuantice, relativiste și gravitaționale. Prin combinarea acestor constante se obțin constantele Planck la nivelul cărora trebuie să se manifeste efectele gravitației cuantice:

Nume	Formula	Valoarea (SI)
Lungimea Planck	l	$1,616229(38) \times 10^{-35} \text{ m}$
Masa Planck		$2,176470(51) \times 10^{-8} \text{ kg}$
Timpul Planck		$5,39116(13) \times 10^{-44} \text{ s}$
Sarcina Planck		$1,875\,545\,956(41) \times 10^{-18} \text{ C}$

⁶⁷⁹ Paul A. M. Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics* (Mineola, NY: Snowball Publishing, 2012).

⁶⁸⁰ R. Arnowitt, S. Deser, și C. W. Misner, „The Dynamics of General Relativity”, *General Relativity and Gravitation* 40, nr. 9 (septembrie 2008): 1997–2027, <https://doi.org/10.1007/s10714-008-0661-1>.

⁶⁸¹ Carlip, „Quantum Gravity”, 64: 885.

⁶⁸² Dean Rickles, „Quantum Gravity: A Primer for Philosophers.”, Preprint, octombrie 2008, <http://philsci-archive.pitt.edu/5387/>.

Tabelul 3.1 Constantele Planck

Acestea sunt cu multe ordini de mărime dincolo de capacitățile experimentale actuale. Dar argumentul scalei se aplică evenimentelor gravitaționale cuantice individuale. Ideea este de a combina astfel de evenimente pentru a amplifica efectele care pot fi detectate cu echipamentele actuale sau din viitorul apropiat. Gravitația cuantică poate fi studiată și prin observarea capătului opus al spectrului scalei, sistemele astronomice, prin observarea radiației cosmice, exploziilor generatoare de raze gama, exploziile Kaon, particule, lumina și radiația cosmică de fond, prin efectele gravitaționale cuantice care s-ar putea manifesta în aceste sisteme. În aceste sisteme, efectele la scala Planck sunt amplificate în mod natural.

Dar astfel de efecte pot fi studiate și în dispozitive experimentale pe Pământ, folosind de asemenea "experimente naturale", precum particule care se deplasează pe distanțe mari la viteze enorme.⁶⁸³ Bryce DeWitt a argumentat că efectele gravitaționale cuantice nu vor fi măsurabile pe particulele elementare individuale, întrucât câmpul gravitațional în sine nu are sens la aceste scale. Câmpul static dintr-o astfel de particulă nu ar depăși fluctuațiile cuantice.⁶⁸⁴

Pentru folosirea universului ca dispozitiv experimental se apelează la ideea că lumina își schimbă proprietățile pe distanțe mari în cazul spațiu-timpului discret, care produce efecte birefringente.⁶⁸⁵ Baza teoretică este că o undă care se propagă în un spațiu-timp discret va încălca invarianța Lorentz, aceasta putând fi o "probă" pentru a testa modelele de gravitație cuantică. Dar discretitudinea spațiu-timpului nu este o condiție suficientă pentru non-invarianța Lorentz: un contraexemplu sunt seturile cauzale care sunt structuri discrete și nu par să o încalce.

⁶⁸³ Rickles.

⁶⁸⁴ B. S. DeWitt și Louis Witten, *The Quantization of Geometry, in Gravitation an Introduction to Current Research*, First Edition edition (John Wiley & Sons, 1962), 372.

⁶⁸⁵ Rodolfo Gambini și Jorge Pullin, „Quantum Gravity Experimental Physics?”, *General Relativity and Gravitation* 31, nr. 11 (1 noiembrie 1999): 1999, <https://doi.org/10.1023/A:1026701930767>.

3.3.2. Gravitația cuantică în bucle

Gravitația cuantică în bucle (GCB) încearcă unificarea gravitației cu celelalte trei forțe fundamentale începând cu relativitatea și adăugând trăsături cuantice. Ea se bazează direct pe formula geometrică a lui Einstein.

În GCB, spațiul și timpul sunt cuantizate la fel ca energia și impulsul în mecanica cuantică. Spațiul și timpul sunt granulare și discrete, existând o dimensiune minimă. Spațiul este considerat ca o țesătură sau o rețea extrem de fină de bucle finite, numite rețele de spin sau spumă de spin, cu o dimensiune limitată inferior de ordinul unei lungimi Planck, aproximativ 10^{-35} metri. Consecințele sale se aplică cel mai bine cosmologiei, în studiul universului timpuriu și fizica Big Bang. Predicția sa principală, neverificată, implică o evoluție a universului dincolo de Big Bang (Big Bounce).

Orice teorie a gravitației cuantice trebuie să reproducă teoria relativității generale a lui Einstein ca o limită clasică. Gravitația cuantică trebuie să poată reveni la teoria clasică când $\hbar \rightarrow 0$. Pentru aceasta trebuie să se evite anomalii cuantice, pentru a nu avea restricții asupra spațiului fizic Hilbert fără corespondent în teoria clasică. Rezultă că teoria cuantică are mai puține grade de libertate decât teoria clasică. Lewandowski, Okolow, Sahlmann și Thiemann⁶⁸⁶ pe de o parte, și Christian Fleischhack⁶⁸⁷ pe de altă parte, au dezvoltat teoreme care stabilesc unicitatea reprezentării buclei așa cum este definită de Ashtekar. Aceste teoreme exclud existența altor teorii în cadrul programului de cercetare GCB și deci, dacă GCB nu are limita semiclassicală corectă, asta ar însemna sfârșitul reprezentării GCB în totalitate.

Programul de gravitație cuantică canonică tratează metrica spațiu-timp ca un câmp și o cuantizează direct, cu spațiul împărțit în straturi tridimensionale. Programul presupune rescrierea relativității generale în formă "canonică" sau "hamiltoniană",⁶⁸⁸ prin un set de variabile de configurație care pot fi codificate într-un spațiu de fază. Se determină apoi evoluția în timp a acestor variabile, mișcările fizice posibile în spațiul de fază, o familie de curbe, se cuantizează, și se generează evoluția dinamică cu ajutorul

⁶⁸⁶ Jerzy Lewandowski et al., „Uniqueness of Diffeomorphism Invariant States on Holonomy–Flux Algebras”, *Communications in Mathematical Physics* 267, nr. 3 (1 noiembrie 2006): 267 (3): 703–733, <https://doi.org/10.1007/s00220-006-0100-7>.

⁶⁸⁷ Christian Fleischhack, „Irreducibility of the Weyl Algebra in Loop Quantum Gravity”, *Physical Review Letters* 97, nr. 6 (11 august 2006): 97 (6): 061302, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.061302>.

⁶⁸⁸ Kuchař, „Canonical Quantization of Gravity”.

operatorului hamiltonian.⁶⁸⁹ Apar astfel unele constrângeri ale variabilelor canonice impuse după cuantificare.

În gravitația canonică în bucle, Ashtekar a folosit un set diferit de variabile cu o metrică mai complexă,⁶⁹⁰ rezolvând mai ușor constrângerile. Prin modificările introduse în prigram, se pot recupera toate caracteristicile geometrice standard ale relativității generale.⁶⁹¹ Avantajul acestei versiuni este un control mai mare (matematic) asupra teoriei (și cuantificării sale).

Programul GCB impune ca o teorie a spațiu-timpului să fie independentă de fundal, față de teoria corzilor unde spațiu-timpul este tratat ca un fond fix. GCB folosește formularea hamiltoniană sau canonică a TGR. Avantajul unei formulări canonice a unei teorii este ușurința și standardizarea cuantificării. Buclele din GCB ne dau o descriere a spațiului. La intersecția buclelor apar noduri care reprezintă unități de bază ale spațiului, care este astfel discretizat; două noduri conectate prin o legătură reprezintă două unități de spațiu una lângă cealaltă. Suprafața este determinată de intersecțiile cu buclele. Se poate astfel imagina un grafic (rețea de spini⁶⁹²) realizat din anumite numere cuantice atașate la acesta. Numerele determină suprafețele și volumele de spațiu.⁶⁹³ Problema timpului în GCB este de a încorpora timpul în această imagine.

GCB consideră TGR ca punct de pornire, la care aplică o procedură de cuantificare pentru a ajunge la o teorie cuantică viabilă a gravitației. În procedura de cuantificare, denumită cuantizare canonică, este necesară reformularea TGR ca sistem hamiltonian, permițând astfel o evoluție în timp a tuturor gradelor de libertate ale sistemului. Formulele hamiltoniane respective împart spațiu-timpul folii de hipersuprafețe spațiale tridimensionale, printr-un formalism denumit ADM după autorii săi (Richard Arnowitt, Stanley Deser și Charles Misner). Formalismul ADM preia metricele induse pe suprafețele spațiale ca variabile ale "poziției" și o combinație liniară a componentelor curburii exterioare a acestor hipersuprafețe care codificând încorporarea lor în spațiu-timp 4-dimensional ca variabile "impuls" conjugate canonic

⁶⁸⁹ Weinstein și Rickles, „Quantum Gravity”.

⁶⁹⁰ Carlo Rovelli, „Notes for a brief history of quantum gravity”, *arXiv:gr-qc/0006061*, 16 iunie 2000, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0006061>.

⁶⁹¹ Lee Smolin, „The case for background independence”, *arXiv:hep-th/0507235*, 25 iulie 2005, 196–239, <http://arxiv.org/abs/hep-th/0507235>.

⁶⁹² Rețeaua de spin este un grafic al cărui noduri reprezintă "bucăți" de spațiu și ale căror legături reprezintă suprafețe care separă aceste bucăți, reprezentând o stare cuantică a câmpului gravitațional sau a spațiului.

⁶⁹³ Matsubara, *Stringed Along Or Caught in a Loop?*

cu metricile.⁶⁹⁴ Ecuațiile hamiltoniene rezultate nu sunt echivalente cu ecuațiile câmpului lui Einstein. Pentru a le face echivalente, trebuiesc introduse restricții, rezultând anumite condiții pentru datele inițiale. Prima familie de constrângeri codifică libertatea de a alege foliația (constrângere hamiltoniană), iar al doilea set de constrângeri ține de libertatea de a alege coordonatele în spațiul 3-dimensional (constrângeri vectoriale), rezultând în total patru ecuații de constrângere. În GCB mai există o familie de constrângeri suplimentare, legate de simetriile interne. Până în prezent au fost rezolvate doar două dintre cele trei familii de constrângeri. Procedura de cuantizare canonică se desfășoară conform lui Paul Dirac,⁶⁹⁵ transformând variabilele canonice în operatori cuantici care acționează pe un spațiu de stare cuantică.

Utilizarea formalismului ADM s-a lovit de complicații tehnice insurmontabile, astfel încât în anii 1980 Abhay Ashtekar a introdus variabile noi care au simplificat ecuațiile constrângerilor, cu dezavantajul pierderii semnificației geometrice directe a variabilelor ADM. În acest caz geometria spațiu-timp este captată de un "câmp triadic" care codifică cadrele inerțiale locale definite pe hipersuprafețe spațiale, mai degrabă decât metricile. Trecerea de la ADM la variabilele Ashtekar reprezintă o reinterpretare a ecuațiilor câmpului Einstein. Teoria generalizată a relativității reinterpretată este apoi supusă procedurii canonice ca mai sus.⁶⁹⁶

În multe abordări al gravitației cuantice, inclusiv în teoria corzilor și în GCB, nici spațiul nu mai este o entitate fundamentală, ci doar un fenomen "emergent" care provine din fizica de bază.⁶⁹⁷ Christian Wüthrich afirmă că nu este clar dacă putem formula o teorie fizică în mod coerent în absența spațiului și a timpului.⁶⁹⁸

O abordare mai nouă este utilizarea așa-numitelor modele "spumă de spini",⁶⁹⁹ care utilizează o integrare a căii pentru a genera spațiu-timpul. Evoluția în timp a rețelelor de spin se presupune că reprezintă spațiu-timpul spațial în termenii spumei de spini.

⁶⁹⁴ Christian Wüthrich, „In Search of Lost Spacetime: Philosophical Issues Arising in Quantum Gravity” (2011).

⁶⁹⁵ Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics*.

⁶⁹⁶ Wüthrich, „In Search of Lost Spacetime”.

⁶⁹⁷ Wüthrich.

⁶⁹⁸ Wüthrich, „To quantize or not to quantize”, 72 : 777-788.

⁶⁹⁹ John W. Barrett și Louis Crane, „Relativistic spin networks and quantum gravity”, *Journal of Mathematical Physics* 39, nr. 6 (iunie 1998): 32:3296–3302, <https://doi.org/10.1063/1.532254>.

GCB este un vast program de cercetare activ, dezvoltat în mai multe direcții cu același nucleu dur.⁷⁰⁰ Două direcții de dezvoltare sunt mai importante: GCB canonică mai tradițională, și GCB covariantă, numită teoria spumei de spin.

Gravitația cuantică în bucle a rezultat dintr-o încercare de a formula o teorie cuantică independentă de fundal. Aceasta ia în considerare abordarea relativității generale că spațiu-timpul este un câmp dinamic și, prin urmare, un obiect cuantic. A doua ipoteză a teoriei este că discretitudinea cuantică care determină comportamentul asemănător cu particulele altor teorii ale câmpului afectează și structura spațiului. Rezultă o structură granulară a spațiului la lungimea Planck. Starea cuantică a spațiu-timpului este descrisă prin intermediul unei structuri matematice denumită rețea de spin. Rețelele de spin nu reprezintă stări cuantice ale unui câmp în spațiu, ci stările cuantice ale spațiu-timpului. Teoria s-a obținut prin reformularea relativității generale cu ajutorul variabilelor Ashtekar.⁷⁰¹ În prezent există mai multe euristici pozitive pe baza cărora se dezvoltă dinamica teoriei.

Termodinamica găurii negre încearcă să concilieze legile termodinamicii cu orizonturile de evenimente ale găurilor negre. Un succes recent al teoriei este calculul entropiei tuturor găurilor negre ne-singulare direct din teorie și independent de alți parametri. Aceasta este singura derivare cunoscută a acestei formule dintr-o teorie fundamentală, în cazul găurilor negre generice care nu sunt singulare. Teoria a permis și calculul corecțiilor gravitației cuantice la entropia și radiația găurilor negre.

În 2014, Carlo Rovelli și Francesca Vidotto au sugerat, pe baza GCB, că există o stea Planck în interiorul unei găuri negre, încercând să rezolve astfel protecția găurii negre și paradoxul informațiilor găurii negre.

Cosmologia cuantică în bucle (CCB) a prezis un Big Bounce înainte de Big Bang. CCB s-a dezvoltat folosind metode care imită pe cele ale GCB, care prezice o "punte cuantică" între ramurile cosmologice contractante și expansive. Prin CCB s-au prezis singularitățile Big Bang, Big Bounce, și un mecanism natural pentru inflație. Dar rezultatele obținute sunt supuse restricției datorită suprimării artificiale a gradelor de libertate. Evitarea singularităților în CCB se face prin mecanisme disponibile numai în aceste modele restrictive; evitarea singularităților în teoria completă poate fi obținută doar printr-o trăsătură mai subtilă a GCB.

⁷⁰⁰ Dirac, *Lectures on Quantum Mechanics*.

⁷⁰¹ Abhay Ashtekar, „New Variables for Classical and Quantum Gravity”, *Physical Review Letters* 57, nr. 18 (3 noiembrie 1986): 57 (18): 2244–2247, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.2244>.

Încă nu s-a confirmat reproducerea TGR ca limităclasică la energie mică în GCB, și încă nu au fost calculate amplitudinile de împrăștiere.

Problemele cele mai presante ale GCB sunt lipsa noastră de înțelegere a dinamicii (incapacitatea de a rezolva ecuația de constrângere hamiltoniană), și eșecul în a explica cum apare spațiul clasic neted (cum reușește TGR în acest caz).

Altă problemă a GCB este o problemă generală a MC: timpul. Carlo Rovelli și Julian Barbour au încercat să formuleze mecanica cuantică într-un mod care nu necesită un timp extern, înlocuind timpul prin relaționarea evenimentelor direct unul cu celălalt.⁷⁰²

Efectele gravitației cuantice sunt dificil de măsurat deoarece lungimea Planck este mult prea mică, dar se încearcă măsurarea efectelor din observațiile astrofizice și detectorii de undă gravitațională. Încă nu s-a dovedit că descrierea GCB a spațiu-timpului la scara Planck are limita continuă corectă descrisă de relativitatea generală cu posibile corecții cuantice. Alte probleme nerezolvate includ dinamica teoriei, constrângerile, cuplarea cu câmpurile de materie, renormalizarea gravitonului.⁷⁰³

Încă nu există o observație experimentală pentru care GCB să fi făcut o predicție diferită de cele din Modelul Standard sau relativitatea generală. Din cauza lipsei unei limite semiclastice, GCB nu a reprodus predicțiile făcute de relativitatea generală.

GCB are dificultăți în încercarea de a permite teoria relativității generale la limita semiclastică, printre care

- Nu există niciun operator care să răspundă difeomorfismelor infinitezimale, acesta trebuie aproximat prin difeomorfisme finite și astfel structura parantezelor Poisson a teoriei clasice nu este reprodusă exact. Problema poate fi eludată prin introducerea unor constrângeri.⁷⁰⁴
- Dificultatea reconcilierii naturii combinatoriale discrete a stărilor cuantice cu natura continuă a câmpurilor teoriei clasice.
- Dificultăți generate de structura parantezelor Poisson care implică difeomorfismul spațial și constrângerile hamiltoniene.⁷⁰⁵

⁷⁰² Carlo Rovelli, „Relational Quantum Mechanics”, *International Journal of Theoretical Physics* 35, nr. 8 (august 1996): 35 : 1637-1678, <https://doi.org/10.1007/BF02302261>.

⁷⁰³ Hermann Nicolai, Kasper Peeters, și Marija Zamaklar, „Loop quantum gravity: an outside view”, *Classical and Quantum Gravity* 22, nr. 19 (7 octombrie 2005): 22(19): R193–R247, <https://doi.org/10.1088/0264-9381/22/19/R01>.

⁷⁰⁴ Thomas Thiemann, *Modern Canonical Quantum General Relativity*, 1 edition (Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2008).

⁷⁰⁵ Thiemann.

- Mecanismele semiclassicalizate dezvoltate se potrivesc doar operatorilor care nu schimbă graficul.
- Problema formulării observabilelor pentru relativitatea generală datorită naturii sale neliniare și invarianței difeomorfismului spațiu-timp.⁷⁰⁶

GCB este o soluție posibilă a gravitației cuantice, la fel ca teoria corzilor dar cu diferențe. Față de teoria corzilor care postulează dimensiuni suplimentare și particule și simetrii suplimentare neobservate, GCB se bazează numai pe teoria cuantică și relativitatea generală, iar domeniul său de aplicare este limitat la înțelegerea aspectelor cuantice ale interacțiunii gravitaționale. În plus, consecințele GCB sunt radicale, modificând fundamental cuantic natura spațiului și a timpului.

3.4 Teoria corzilor

În teoria câmpului cuantic, principalul obstacol este apariția infinităților netratabile în interacțiunile particulelor datorită posibilității unor distanțe arbitrare între particulele punctuale. Corzile, ca obiecte extinse, oferă un cadru mai bun, care permite calcule finite.⁷⁰⁷ Teoria corzilor face parte dintr-un program de cercetare în care particulele punctuale din fizica particulelor sunt înlocuite de obiecte unidimensionale numite *corzi*. Ea descrie modul în care aceste corzi se propagă prin spațiu și interacționează una cu cealaltă. La scale de dimensiuni mai mari, o coardă arată ca o particulă obișnuită, cu masă, sarcină și alte proprietăți determinate de starea vibrațională a corzii. Una din stările vibraționale ale corzilor corespunde gravitonului, particula ipotetică din mecanică cuantică pentru forța gravitațională.⁷⁰⁸ Teoria corzilor se manifestă de obicei în cazul energiilor foarte mari, precum în fizica găurilor negre, cosmologia universului timpuriu, fizica nucleară și fizica materiei condensate. Teoria corzilor încearcă să unifice gravitația și fizica particulelor, iar versiunile ei ulterioare încearcă să modifice toate forțele fundamentale din fizică.⁷⁰⁹

Scopul teoriei corzilor a fost înlocuirea particulelor elementare cu corzi unidimensionale pentru a se putea face unificarea fizicii cuantice și a gravitației.

⁷⁰⁶ B. Dittrich, „Partial and Complete Observables for Hamiltonian Constrained Systems”, *General Relativity and Gravitation* 39, nr. 11 (1 noiembrie 2007): 39 (11): 1891–1927, <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0495-2>.

⁷⁰⁷ Dawid, „Scientific Realism in the Age of String Theory”.

⁷⁰⁸ Katrin Becker, Melanie Becker, și John H. Schwarz, *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction* (Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2007), 2–3.

⁷⁰⁹ Becker, Becker, și Schwarz, 3, 15–16.

Programul de cercetare al teoriei corzilor se bazează pe o presupunere din 1930, conform căreia relativitatea generală seamănă cu teoria unui câmp de spin-doi fără masă, în spațiul plat minkowskian.⁷¹⁰ Cuantificarea unei astfel de teorii s-a dovedit a nu fi renormalizabilă perturbativ, implicând infinități care nu pot fi eliminate. Această teorie timpurie a fost abandonată până pe la mijlocul anilor 1970, când s-a dezvoltat că o teorie a corzilor unidimensionale.

De remarcat că teoria corzilor a fost inițial dezvoltată, la sfârșitul anilor 1960 și începutul anilor 1970, în fizica particulelor - *teoria corzilor bosonice*, care s-a ocupat doar de bosoni. După un succes temporar ca o teorie a hadronilor, cromodinamica cuantică a fost recunoscută drept teoria corectă a hadronilor. În 1974 Tamiaki Yoneya a descoperit că teoria prevede o particulă masivă de spin 2, considerată a fi un graviton. John Schwarz și Joel Scherk au reintrodus teoria lui Kaluza-Klein pentru dimensiunile suplimentare, a recuperat programul de bootstrap abandonat, și astfel a început programul de cercetare a teoriei corzilor în gravitația cuantică. Un exemplu tipic de revigorare a unui program de cercetare în sensul lui Lakatos (programul de bootstrap) și schimbare a direcției de cercetare a altui program (teoria corzilor) a cărei euristică, prin adăugarea unei teorii suplimentare (Kaluza-Klein), s-a dovedit mult mai utilă în altă direcție decât cea prevăzută inițial. Ulterior s-a dezvoltat în *teoria supercorzilor*, pe baza supersimetriei între bosoni și fermioni,⁷¹¹ apărând apoi și alte versiuni ale teoriei. La mijlocul anilor 1990 oamenii de știință s-au concentrat pe dezvoltarea unui program de cercetare unificator, o teorie în unsprezece dimensiuni sub numele de *teoria M*.

Corzile nu au numere cuantice, dar diferă între ele prin forma topologică (deschise sau închise, moduri de compactizare) și dinamica lor (moduri de oscilație). Ele pot fi percepute la scară macroscopică drept particule punctuale cu anumite numere cuantice. Schimbarea modului de oscilație corespunde unei transformări într-o altă particulă. Corzile la nivel fundamental nu au constante de cuplare. Interacțiunea dintre ele corespunde dinamicii lor.⁷¹²

Pentru fiecare versiune a teoriei corzilor există un singur tip de coardă, ca o buclă mică sau un segment de coardă, care poate vibra în moduri diferite. În programul

⁷¹⁰ A. Capelli, „The Birth of String Theory Edited by Andrea Cappelli”, Cambridge Core, aprilie 2012, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511977725>.

⁷¹¹ Becker, Becker, și Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 4.

⁷¹² Vincent Lam, „Quantum Structure and Spacetime.”, *Metaphysics in Contemporary Physics*, 1 ianuarie 2016, 81–99, https://doi.org/10.1163/9789004310827_005.

de cercetare al teoriei corzilor, scala lungimii caracteristice a corzilor este de ordinul lungimii Planck (10^{-35} metri), peste care se consideră că efectele gravitației cuantice devin semnificative.⁷¹³ La dimensiuni obișnuite, astfel de obiecte nu se pot distinge de particule punctuale zero-dimensionale. Există mai multe variante ale teoriei supercorzilor: tip I, tip IIA, tip IIB și două tipuri de corzi heterotice, $SO(32)$ și $E_8 \times E_8$.

Teoriile corzilor necesită dimensiuni suplimentare ale spațiu-timpului, pentru consistența matematică. În teoria corzilor bosonice, spațiu-timpul este 26-dimensional, în timp ce în teoria supercorzilor este 10-dimensional, iar în teoria-M este 11-dimensional. Aceste dimensiuni suplimentare nu vor putea fi observate în experimente,⁷¹⁴ datorită unei compactări a acestora prin care se "închid" pe ele însele formând cercuri. La limită, când aceste dimensiuni suplimentare tind către zero, se ajunge la spațiu-timpul obișnuit. Pentru ca teoriile să descrie corect lumea, dimensiunile compactate trebuie să fie în forma varietății topologice Calabi-Yau.⁷¹⁵

O altă modalitate de reducere a numărului de dimensiuni este folosind scenariul cosmologiei membranelor ("brane-world"), considerând universul observabil ca un subspațiu tridimensional al unui spațiu cu mai multe dimensiuni. În aceste modele, gravitația apare din corzile închise aflate într-un spațiu cu mai multe dimensiuni, explicându-se astfel și puterea mai mică a gravitației în comparație cu celelalte forțe fundamentale.⁷¹⁶ În teoria corzilor, o *brană* (prescurtarea de la "membrană") generalizează noțiunea de particulă punctuală la dimensiuni diferite de zero. Branele sunt corpuri fizice care se supun regulilor mecanicii cuantice.⁷¹⁷

O particularitate a teoriilor din acest program de cercetare sunt "dualitățile", transformări matematice care identifică teoriile fizice din cadrul acestui program între ele, trăgându-se concluzia că toate aceste teorii sunt subsumate uneia singure, teoria-M.⁷¹⁸ Două teorii sunt duale dacă sunt exact echivalente în ceea ce privește consecințele observaționale, deși sunt construite în mod diferit și pot implica diferite obiecte și scenarii topologice.⁷¹⁹ Diferitele teorii din cadrul programului de cercetare al teoriei corzilor sunt legate între ele prin mai multe relații, una fiind relația specifică de

⁷¹³ Becker, Becker, și Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 6.

⁷¹⁴ Barton Zwiebach, *A First Course in String Theory*, 2 edition (Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2009).

⁷¹⁵ Shing-Tung Yau, *The Shape of Inner Space*, Reprint edition (Basic Books, 2012), cap. 6.

⁷¹⁶ Randall și Sundrum, „An Alternative to Compactification”, 83 (23): 4690–4693.

⁷¹⁷ Gregory Moore, „What Is... a Brane?”, *Notices of the American Mathematical Society* 52, nr. 2 (28 noiembrie 2005): 214, <https://www.researchwithrutgers.com/en/publications/what-is-a-brane>.

⁷¹⁸ Becker, Becker, și Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 9–12.

⁷¹⁹ Dawid, „Scientific Realism in the Age of String Theory”.

corespondență numită dualitatea S.⁷²⁰ O altă relație, numită dualitatea T, ia în considerare corzi care se propagă în jurul unei dimensiuni circulare suplimentare. În 1997 s-a descoperit corespondența teoriei câmpurilor anti-de Sitter/conforme (AdS/CFT),⁷²¹ care relaționează teoria corzilor cu o teorie a câmpului cuantic.⁷²² Într-un cadru mai general, corespondența AdS/CFT este o dualitate care corelează teoria corzilor cu alte teorii fizice mai bine înțelese teoretic, cu implicații în studiul găurilor negre și gravitației cuantice, dar și în fizica nucleară⁷²³ și materia condensată.⁷²⁴

Dualitățile din teoria corzilor au fost conexe de filosofi cu probleme specifice filosofiei, precum subdeterminarea, convenționalismul și emergența/reducția. Astfel, spațiu-timpul a ajuns să fie considerat de unii fizicieni drept o entitate emergentă, care depinde, de ex., e puterea de cuplare care guvernează interacțiunile fizice. Conform dualității AdS/CFT, o teorie a corzilor cu 10 dimensiuni este echivalentă din punct de vedere observațional cu o teorie gauge în 4 dimensiuni - dualitatea "gauge/gravitație". Din aceste dualități rezultă că teoriile, fiind echivalente, nu sunt fundamentale, și deci nici spațiu-timpul descris nu este fundamental, ci un fenomen emergent.⁷²⁵ În acest program, teoria gauge și teoria gravitațională sunt limite clasice ale unei teorii cuantice mai cuprinzătoare, unificatoare. Filosofii se întreabă dacă două teorii duale sunt distincte în sens fizic sau doar variante notaționale ale aceleiași teorii.^{726 727}

În 1995, Edward Witten a sugerat că cele cinci familii de teorii din cadrul programului de cercetare al teoriei corzilor sunt cazuri limitative speciale ale unei teorii cu 11 dimensiuni numită teoria-M.⁷²⁸ În 1997, Tom Banks, Willy Fischler, Stephen Shenker și Leonard Susskind au propus un model de matrice pentru teoria M cu 11 dimensiuni, unde limita de energie redusă a acestui model este supergravitația cu unsprezece dimensiuni.⁷²⁹

⁷²⁰ Becker, Becker, și Schwarz, *String Theory and M-Theory*.

⁷²¹ Becker, Becker, și Schwarz, 14–15.

⁷²² Zwiebach, *A First Course in String Theory*, 376.

⁷²³ Igor R. Klebanov și Juan M. Maldacena, „Solving quantum field theories via curved spacetimes”, *Physics Today* 62, nr. 1 (1 ianuarie 2009): 62 (1): 28–33, <https://doi.org/10.1063/1.3074260>.

⁷²⁴ Subir Sachdev, „Strange and Stringy”, *Scientific American* 308 (1 decembrie 2012): 308 (44): 44–51, <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0113-44>.

⁷²⁵ Tiziana Vistarini, „Emergent Spacetime in String Theory”, 2013, 103.

⁷²⁶ Joseph Polchinski, „Dualities of Fields and Strings”, *arXiv:1412.5704 [hep-th]*, 17 decembrie 2014, <http://arxiv.org/abs/1412.5704>.

⁷²⁷ Rickles, „A philosopher looks at string dualities”, 42: 54–67.

⁷²⁸ Michael J. Duff, „The Theory Formerly Known as Strings”, *Scientific American* 278 (1 februarie 1998): 278 (2): 64–9, <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0298-64>.

⁷²⁹ T. Banks et al., „M theory as a matrix model: A conjecture”, *Physical Review D* 55, nr. 8 (15 aprilie 1997): 55 (8): 5112–5128, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.5112>.

Feynman privește teoria cuantică a gravitației ca "doar o altă teorie a câmpului cuantic" cum ar fi electrodinamica cuantică. Diferitele tipuri de particule existente sunt excitații diferite ale aceleiași corzi. Întrucât unul din modurile de oscilare a corzilor este o stare de spin-2 fără masă care se identifică cu gravitonul, teoria corzilor include în mod necesar gravitația cuantică. Teoria corzilor modifică gravitația punctuală a particulelor la distanțe scurte prin schimbul de stări masive ale corzilor.⁷³⁰ În teoriei corzilor, dimensiunea spațiu-timpului nu este o proprietate intrinsecă a teoriei în sine, ci o proprietate a soluției particulare.

În timp ce teoria corzilor nu poate oferi în prezent predicții falsificabile, ea a inspirat, totuși, propuneri noi și imaginative pentru rezolvarea problemelor restante în fizica particulelor și cosmologie. Teoria corzilor din perioada timpurie, când se ocupa de fizica hadronilor, poate explica de ce fermionii vin în trei generații ierarhice, și ratele de amestecare între generațiile de cuarci.⁷³¹ În a doua perioadă în care a abordat gravitația cuantică, teoria a abordat paradoxul informațiilor despre gaura neagră, numărarea entropiei corecte a găurilor negre⁷³² și procesele de schimbare a topologiei.⁷³³ Descoperirea corespondenței AdS/CFT a condus la o formulare a teoriei corzilor în funcție de teoria câmpului cuantic, mai bine înțeleasă, și a oferit un cadru general pentru rezolvarea paradoxurilor găurilor negre,⁷³⁴ precum cel în cazul radiației Hawkins a găurilor negre (paradoxul informațiilor).⁷³⁵ Prin programul său de cercetare, a condus la multe descoperiri teoretice în matematică și teoria gauge.

Teoria corzilor este considerată a fi un instrument util în investigarea proprietăților teoretice ale termodinamicii găurilor negre,⁷³⁶ respectiv entropia acestora.⁷³⁷ Bazele teoretice pentru aceste investigații u luat în considerare cazul unor găuri negre idealizate, cu masa cea mai mică posibilă compatibilă cu o sarcină dată.⁷³⁸

⁷³⁰ Feynman et al., *Feynman Lectures on Gravitation*.

⁷³¹ Jonathan J. Heckman și Cumrun Vafa, „Flavor Hierarchy From F-theory”, *Nuclear Physics B* 837, nr. 1–2 (septembrie 2010): 837 (1): 137–151, <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2010.05.009>.

⁷³² Andrew Strominger și Cumrun Vafa, „Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy”, *Physics Letters B* 379, nr. 1 (27 iunie 1996): 379 (1–4): 99–104, [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(96\)00345-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00345-0).

⁷³³ A. Adams et al., „Things Fall Apart: Topology Change from Winding Tachyons”, *Journal of High Energy Physics* 2005, nr. 10 (11 octombrie 2005): (10): 033, <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2005/10/033>.

⁷³⁴ Sebastian de Haro et al., „Forty Years of String Theory Reflecting on the Foundations”, *Foundations of Physics* 43, nr. 1 (1 ianuarie 2013): 2, <https://doi.org/10.1007/s10701-012-9691-3>.

⁷³⁵ Leonard Susskind, *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*, Reprint edition (New York: Back Bay Books, 2009).

⁷³⁶ de Haro et al., „Forty Years of String Theory Reflecting on the Foundations”, 2.

⁷³⁷ Yau, *The Shape of Inner Space*, 189.

⁷³⁸ Yau, 192–93.

Acest rezultat poate fi generalizat la orice teorie a gravitației,⁷³⁹ putându-se extinde la găuri negre astrofizice non-extreme.⁷⁴⁰

În teoria Big Bang, parte a modelului cosmologic predominant pentru univers, expansiunea rapidă inițială a universului este cauzată de o particulă ipotetică numită inflaton. Proprietățile exacte ale acestei particule nu sunt cunoscute. Ele ar trebui să fie derivate dintr-o teorie mai fundamentală, precum teoria corzilor.⁷⁴¹ Dezvoltarea acestui subprogram din cadrul programului de cercetare al teorie corzilor este în curs de dezvoltare.⁷⁴²

În teoria branelor, branele D au fost identificate cu soluțiile de supergravitație cu găuri negre. Leonard Susskind a identificat principiul holografic al lui Gerardus 't Hooft cu stări obișnuite ale găurilor negre termice.

Recent, unele experimente din alte domenii, precum fizica materiei condensate, au utilizat rezultate teoretice ale teoriei corzilor.⁷⁴³ Iar inseparabilitatea cuantică în supraconductori se bazează în mare măsură pe ideile dualității și a dimensiunilor spațiale suplimentare dezvoltate în teoria corzilor. Cu ajutorul dualității dintre teoriile gauge 4-dimensiunale și gravitația 5-dimensională, teoreticienii corzilor au prezis valoarea experimentală a entropiei în plasmă, rezultat neobținut prin niciun alt model teoretic, dar acestea nu sunt validări experimentale absolute.^{744 745}

Se speră ca dimensiunile suplimentare să poată fi observate cu ajutorul Hadron Collider (LHC) de la CERN, Geneva, dar o eventuală infirmare nu ar însemna refutarea teoriei.

Pentru mulți cercetători, teoria gauge este considerată drept singura modalitate de a renormaliza relații, iar teoria corzilor singura opțiune de a elimina infinitățile unui program unificator al fizicii cuantice și gravitației. Teoria corzilor a fost coroborată experimental inițial ca teorie din fizica particulelor, dar în dezvoltarea actuală este considerată a fi departe de a putea fi considerată falsificabilă. Continuarea programului

⁷³⁹ Andrew Strominger, „Black Hole Entropy from Near-Horizon Microstates”, *Journal of High Energy Physics* 1998, nr. 02 (15 februarie 1998): (2): 009, <https://doi.org/10.1088/1126-6708/1998/02/009>.

⁷⁴⁰ Alejandra Castro, Alexander Maloney, și Andrew Strominger, „Hidden conformal symmetry of the Kerr black hole”, *Physical Review D* 82, nr. 2 (13 iulie 2010): (2): 024008, <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.024008>.

⁷⁴¹ Becker, Becker, și Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 533.

⁷⁴² Becker, Becker, și Schwarz, 539–43.

⁷⁴³ Sachdev, „Strange and Stringy”, 44–51.

⁷⁴⁴ Dawid, *String Theory and the Scientific Method*.

⁷⁴⁵ Paul Verhagen, „Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory” (Amsterdam University College, 2015), <http://www.uva.nl/binaries/content/documents/personalpages/h/a/s.deharo/en/tab-three/tab-three/cpitem%5B8%5D/asset>.

se bazează pe încrederea că teoria este cel mai bun candidat pentru un program unificator total. Credibilitatea ei este sporită de interconexiunile create în decursul dezvoltării sale, precum în cazul supersimetriei și al cosmologiei găurilor negre.

Teoria corzilor încă nu are o definiție satisfăcătoare în toate circumstanțele. Teoria apelează la tehnici perturbative,⁷⁴⁶ dar încă nu a clarificat aspectele care țin de determinarea proprietăților universului,⁷⁴⁷ astfel încât a atras critici ale unor oameni de știință, punând la îndoială valoarea cercetărilor în această direcție.⁷⁴⁸

Criticii teoriei corzilor atrag atenția asupra numărului mare de soluții posibile descrise de teoria corzilor. Potrivit lui Woit,

”Posibila existență, de exemplu, a 10500 de stări diferite de vid în teoria supercorzilor, probabil distruge speranța de a folosi teoria pentru a prezice orice. Dacă cineva alege între acest set mare doar acele stări ale căror proprietăți sunt de acord cu observațiile experimentale actuale, este probabil că va exista încă un număr atât de mare încât se poate obține oricare valoare dorită pentru rezultatele oricărei noi observații.”⁷⁴⁹

Adepții teoriei susțin că acest lucru poate fi un avantaj, permițând o explicație antropică naturală a valorilor observate ale constantelor fizice.⁷⁵⁰

O altă critică se focalizează pe dependența teoriei de fundal, spre deosebire de relativitatea generală. Lee Smolin susține că aceasta este principala slăbiciune a teoriei corzilor ca o teorie a gravitației cuantice.⁷⁵¹

Soluțiile teoriei nu sunt unice, și nu există niciun mecanism perturbativ pentru a selecta o soluție particulară sau pentru a alege adevăratul vid. Astfel încât formularea perturbativă a teoriei corzilor își pierde puterea predictivă. De asemenea, nu există niciun mecanism perturbativ pentru a selecta soluții care să admită spectre de energie scăzută care nu sunt supersimetrice.⁷⁵²

Paul Verhagen se întreabă cum ar trebui să evaluăm teoria corzilor; poate o teorie care are dificultăți considerabile cu verificarea experimentală și să fie clasificată ca știință? pentru a răspunde la această întrebare trebuie să analizăm originilor diferitelor concepte folosite în teorie, să evaluăm necesitatea unei mari teorii unificate, și să ne concentrăm pe evaluarea situației ei științifice. Unii susțin că teoria corzilor a

⁷⁴⁶ Becker, Becker, și Schwarz, *String Theory and M-Theory*, 8.

⁷⁴⁷ Becker, Becker, și Schwarz, 13–14.

⁷⁴⁸ Zee, *Quantum Field Theory in a Nutshell*, 2nd Edition.

⁷⁴⁹ Peter Woit, *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*, Reprint edition (Basic Books, 2007), 242.

⁷⁵⁰ Woit, 242.

⁷⁵¹ Smolin, *The Trouble With Physics*, 184.

⁷⁵² Feynman et al., *Feynman Lectures on Gravitation*.

eșuat, în timp ce alții evidențiază progresele sale teoretice. Există o "ruptură meta-paradigmatică" între experimentalisti și teoreticieni în acest sens.⁷⁵³

Chalmers consideră că o teorie trebuie să fie falsificabilă în sensul lui Popper⁷⁵⁴ pentru a fi științifică: "Dacă o afirmație este nediferențiată, atunci lumea poate avea orice proprietăți și poate să se comporte în orice fel, fără a intra în conflict cu declarația."⁷⁵⁵ În acest sens, teoria corzilor este considerată ca nefalsificabilă.⁷⁵⁶ Tehnologia actuală nu este suficient de precisă pentru a elabora experimente care să verifice teoria corzilor. Dar teoria este "potențial" falsificabilă; face anumite previziuni, precum existența unor dimensiuni suplimentare, dar acestea nu pot fi verificate, cel puțin deocamdată. Și încă nu au fost elaborate toate consecințele matematice ale axiomelor pentru a detecta eventuale conflicte cu realitatea observată. Dar se fac eforturi în această direcție, și pentru partea experimentală și pentru cea teoretică.

Fizicienii adepți ai teoriei corzilor sunt acuzați că nu țin seama de testabilitatea empirică și înlocuiesc acest criteriu cu argumente matematice. Unele din întrebările fizicienilor și filosofilor sunt:

1. Este necesar ca o teorie să fie testabilă, sau sunt suficiente experimentele mentale?
2. Este necesar ca o teorie să facă predicții verificabile, sau este suficientă o testabilitate indirectă?
3. teorie fără predicții, doar distribuții de probabilități, este considerată testabilă?
4. Testele trebuie să fie neapărat empirice, sau verificările de consistență matematică pot fi considerate și ele teste?
5. Dacă din testele mentale prin reducere la absurd se obțin rezultate contradictorii sau inacceptabile, ce valoare au aceste teste?
6. Când se poate solicita testabilitatea? E valabilă posibilitatea unei testări viitoare?
7. Cât de importantă este testabilitatea în raport cu alte deziderate epistemice? O teorie ușor de testat dar cu o valoare explicativă scăzută este preferată față de o teorie netestabilă dar cu o putere explicativă mai mare? Dar dacă teoria testabilă este prea complicată și cea netestabilă este simplă și elegantă?

⁷⁵³ Verhagen, „Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory”.

⁷⁵⁴ Popper, *Conjectures and Refutations*.

⁷⁵⁵ Alan F. Chalmers, *What Is This Thing Called Science?*, 3 edition (Indianapolis: Hackett Publishing Co., 1999), 63.

⁷⁵⁶ H. Georgi și Paul Davies, *Grand Unified Theories*, in *The New Physics* (Cambridge University Press, 1992).

8. Predicțiile noilor fenomene sunt mai importante decât pre- sau retrodicțiile fenomenelor deja cunoscute?⁷⁵⁷

Reiner Hedrich sugerează⁷⁵⁸ că insuccesul actual al teoriei corzilor s-ar putea datora aparatului matematic greșit ales, folosind matematica continuumului. Este posibil ca atunci când teoria își va găsi principiul fundamental, aceasta ar putea conduce la o bază matematică mai adecvată. O formulare independentă de fundal și principiul holografic ar putea ajuta euristic în găsirea acestui principiu. Dar e posibil ca principiul să nu fie găsit niciodată, eventual datorită ipotezelor de bază greșite.

În prezent, teoria corzilor este programul de cercetare dominant în fizica teoretică a energiei înalte,⁷⁵⁹ considerată de unii oameni de știință ca fără alternative viabile.⁷⁶⁰ Peter Woit consideră acest statut al teoriei ca nesănătos și în detrimentul viitorului fizicii fundamentale, popularitatea ei datorându-se în mare parte structurii financiare a mediului academic și concurenței acerbe a resurselor limitate.⁷⁶¹ Roger Penrose exprimă opinii similare, afirmând: "Competiția adesea frenetică pe care această ușurință de comunicare o naște duce la efecte de bandwagon, unde cercetătorii se tem că vor rămâne în urmă dacă nu se vor alătura."⁷⁶²

Pozitiviști logici au considerat că metoda științifică înseamnă deducerea modelelor de natură din observații. Teoria corzilor s-a dezvoltat inițial pe baza unui fapt observat, pantele lui Regge, care în prezent nu se mai consideră ca fiind explicate de această teorie. Iar teoria nu a fost până în prezent confirmată prin niciun experiment sau observație empirică. Dar a continuat să se dezvolte, sesținută de credința multor fizicieni că este mult mai bună decât teoria câmpului cuantic pentru gravitația cuantică, și în speranța că va ajuta la unificarea gravitației cu celelalte fore fundamentale. Cei mai mulți adepți par să fie complet indiferenți la experimente și observații, fiind mai

⁷⁵⁷ Helge Kragh, „Fundamental Theories and Epistemic Shifts: Can History of Science Serve as a Guide?”, *arXiv:1702.05648 [physics]*, 18 februarie 2017, <http://arxiv.org/abs/1702.05648>.

⁷⁵⁸ Reiner Hedrich, „The Internal and External Problems of String Theory: A Philosophical View”, *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 38, nr. 2 (2006): 261–278.

⁷⁵⁹ Penrose, *The Road to Reality*, 1017.

⁷⁶⁰ Woit, *Not Even Wrong*, cap. 16.

⁷⁶¹ Woit, 239.

⁷⁶² Penrose, *The Road to Reality*, 1018.

degrabă preocupați de "eleganța" formulării matematice a teoriei.⁷⁶³ Din această cauză, o reconciliere între teoria corzilor și pozitiviștii logici pare imposibilă.⁷⁶⁴

Richard Dawid susține că teoria corzilor se bazează pe observații, dar problema ei ar fi imensa "distanță teoretică" între fenomenele observabile și conceptele științifice. Unii cercetători susțin că principiul subdeterminării empirice a teoriilor științifice nu admite că această "distanță teoretică" poate fi făcută să permită afirmații fiabile despre natură. Pentru aceasta, Dawid consideră că principiul subdeterminării trebuie înlocuit de argumentele care să susțină teoria corzilor. Problema acestei teorii este, după Dawid, arbitraritatea în alegerea principiilor sale fundamentale. Teoria are un anumit set de postulate fizice, dar există o eroziune continuă a acestor postulate care urmează o cale liniară determinată în mod unic. Astfel, Dawid afirmă că dezacordul dintre teoreticienii corzilor și fizicienii fenomenologici cu privire la statutul corzilor dispare datorită unei schimbări dramatice a caracteristicilor teoriei științifice: vechea concepție de subdeterminare a teoriilor științifice din fizica modernă a particulelor pierde treptat teren în fața principiului unicității teoretice. Teoria corzilor ar induce o nouă înțelegere a ceea ce se poate numi o declarație științifică despre natură: pretenția de unicitate teoretică este suficientă pentru adoptarea unei noi teorii științifice.⁷⁶⁵

În 1995, din unificarea teoriilor corzilor a luat naștere cel mai pretențios program de cercetare în gravitație, unificator, teoria M 11-dimensională,⁷⁶⁶ cu scopul de a unifica gravitația cu toate celelalte forțe fundamentale din fizică.

3.4.1 Euristicele teoriei corzilor

Pozitiviștii logici ar fi considerat teoria corzilor ca o metafizică speculativă. Aspectul instrumentalist al pozitivismului logic nu corespunde cu opiniile teoreticienilor corzilor.

Din punctul de vedere al falsificaționismului lui Popper,⁷⁶⁷ distingem clar între contextul descoperirii și contextul de justificare. În contextul descoperirii nu există reguli metodologice, dar există norme stricte pentru testarea ipotezelor, evitând pe cât

⁷⁶³ F. David Peat, *Superstrings and the Search for the Theory of Everything*, 1 edition (Place of publication not identified: McGraw-Hill Education, 1989), 276.

⁷⁶⁴ Verhagen, „Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory”.

⁷⁶⁵ Dawid, „Scientific Realism in the Age of String Theory”.

⁷⁶⁶ Duff, „The Theory Formerly Known as Strings”, 278 (2): 64–9.

⁷⁶⁷ Popper, *The Logic of Scientific Discovery*.

posibil ipotezele ad-hoc, care trebuie să fie oricum independent verificabile. Teoria corzilor nu a fost testată încă și a intrat deja într-o fază de ipoteze ad-hoc. Dar nici nu a fost refutată deocamdată, iar teoria permite testarea prin experimente, chiar dacă deocamdată nu există tehnologia necesară pentru a elabora aceste experimente. O situație neprevăzută de Popper?

Kuhn a adoptat o perspectivă externalistă în filosofia științei. Nu întotdeauna motivațiile științifice reușesc să explice schimbările de paradigmă, în această ecuație putând intra și alte cauze externe, inclusiv cele sociale.⁷⁶⁸ Teoria lui Kuhn este mai degrabă o relatare a istoriei științei, retrospectivă, nu a avut niciodată drept scop să ofere o metodologie cu forță normativă. Conform multor cercetători, scopul său nu este de a oferi criterii pentru schimbările de paradigme.⁷⁶⁹ Teoria revoluțiilor științifice a lui Thomas Kuhn prin schimbarea "paradigmelor" se poate aplica și teoriei corzilor ca o nouă paradigmă în fizica energiei înalte. Dar o schimbare de paradigmă presupune renunțarea la vechea paradigmă, trecându-se printr-o perioadă de "criză" în care apar anomalii, și observații care contrazic vechea paradigmă.⁷⁷⁰ Anomaliile sunt discrepanțe între teorie și experiment. Dar în teoria corzilor nu există experimente, iar problemele de natură teoretică au fost cunoscute de la început. Astfel, noua paradigmă nu pare cu nimic mai bună ca cea veche.

Întrucât teoria corzilor nu a fost până în prezent capabilă să explice fenomenele, ar putea părea că aceasta confirmă opinia lui Feyerabend că nu există o "metodă" a științei. Și totuși, teoria corzilor este în continuare cel mai activ program de cercetare pentru gravitația cuantică. Dar, față de alte teorii nefalsificabile, aceasta are ceva în plus, special: limbajul matematic, cu o logică clară a decucțiilor. Până la un punct poate reproduce teoriile clasice gauge și relativitatea generală. Și există speranța ca într-un viitor nu foarte îndepărtat să se poată elabora experimente care să verifice teoria.

Teoria corzilor este denumită de Keizo Matsubara un "program de cercetare" și acest lucru este în sensul lui Lakatos.⁷⁷¹ Hacking a preluat teoria lui Lakatos,⁷⁷² dar nu ca normă metodologică, mai degrabă ca o metodă de reconstrucție rațională a

⁷⁶⁸ Thomas S. Kuhn și Jim Conant, *The Road Since Structure: Philosophical Essays, 1970-1993, with an Autobiographical Interview* (University of Chicago Press, 2000), 286–87.

⁷⁶⁹ Matsubara, *Stringed Along Or Caught in a Loop?*

⁷⁷⁰ Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 202.

⁷⁷¹ Matsubara, „Realism, Underdetermination and String Theory Dualities”.

⁷⁷² Ian Hacking, „Representing and Intervening by Ian Hacking”, Cambridge Core, octombrie 1983, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511814563>.

perioadelor istoriei științei. Keizo Matsubara susține metodologia lui Lakatos, evidențiind principalele sale caracteristici în cazul teoriei corzilor:⁷⁷³

Nucleul dur:

1. Obiectele fundamentale nu sunt particule punctuale, ci obiecte extinse, corzi sau brane.
2. Acceptarea ipotezelor de bază ale mecanicii cuantice așa cum sunt date.
3. Necesitatea supersimetriei teoriei.

Centura de protecție:

- Diferitele variante ale teoriei corzilor sunt diferitele formulări teoretice, nu teorii diferite.
- Dimensiunile compacte sunt prea mici pentru a fi observate cu tehnologia actuală.
- Explicarea valorilor constantelor naturii presupunând un peisaj al universurilor.

Euristica pozitivă:

1. Explicarea diversității particulelor ca simple manifestări ale unui tip fundamental de obiecte.
2. Derivarea constantei naturii
3. Unificarea modelului standard cu gravitația.

Euristica negativă:

1. Nu se permite niciun argument *modus tollens* să fie îndreptat împotriva nucleului dur.

Comparativ cu celelalte programe teoria corzilor pare să fie mai progresiv într-un sens mai general. Iar distincția program progresiv/degenerativ nu se poate face întrucât lipsesc testele empirice. Dar încercările eșuate ale teoreticienilor pe parcursul unei mari perioade de a determina constantele naturii pornind de la principiile teoriei se poate considera ca fiind o fază degenerativă în sensul lui Lakatos în care

⁷⁷³ Matsubara, *Stringed Along Or Caught in a Loop?*

constatările empirice determină dezvoltarea teoretică, deși în acest caz rezultatele empirice erau cunoscute în avans, și nu prezise. Concluzia lui Matsubara este că teoria corzilor este un program degenerativ, și deci ar trebui respins dacă ar exista un program rival la fel de progresiv.⁷⁷⁴ Din păcate, în prezent celelalte programe de cercetare sunt cel puțin la fel de neconcludente.

Referitor la aplicarea metodologiei lui Lakatos la teoria corzilor, Quine a afirmat:

”Consider că teoria lui Lakatos, MSRP, este cea mai rezonabilă analiză a dezvoltării științifice; se potrivește unui număr destul de mare de episoade din istoria științei și cred că aceasta atinge echilibrul corect între o descriere descriptivă și normativă a științei. De asemenea, este, într-o oarecare măsură, utilă pentru discutarea teoriei corzilor și a concurenților săi, în principal a gravitației cuantice în bucle. Cu toate acestea, nu se poate spune cu adevărat că un program [din cele enumerate] este progresiv și celălalt degenerativ, deoarece distincția și comparația se fac în termeni de dezvoltare teoretică și empirică, și nu s-a produs nicio dezvoltare empirică. Pe de altă parte, fără a folosi criteriile lui Lakatos și în loc să se bazeze doar pe noțiunea noastră oarecum vagă de dezvoltare, cineva este tentat să spună că teoria corzilor a fost teoretic progresivă, dar nu progresivă empiric. S-ar putea spune că adepții teoriei corzilor cred că progresivitatea teoretică este suficientă pentru a continua lucrul la teorie, în timp ce criticii cred că nu este.”⁷⁷⁵

Cartwright și Frigg au ajuns la concluzii similare analizând teoria corzilor prin prisma metodologiei lui Lakatos, evaluând gradul de progresivitate al teoriei în funcție de: gama de aplicații empirice, predicțiile de succes, reproducerea noilor tehnologii, răspunsul la probleme, coerența, eleganța, puterea explicativă, adevărul. Concluzia lor a fost că teoria corzilor a fost progresivă ca putere explicativă și unificatoare, dar aceasta este insuficient pentru a afirma progresivitatea teoriei în general. Dar autorii nu recomandă respingerea teoriei, făcând apel la toleranța metodologică propusă de Lakatos.⁷⁷⁶

Reiner Hedrich afirmă că în prezent ”teoria corzilor” nu este deloc o teorie, ci o structură labirintică a procedurilor și intuițiilor matematice. Singurele motivații ale sale față de GCB sunt incompatibilitatea reciprocă a modelului standard al teoriei câmpului cuantic și a relativității generale, și metafizica programului de unificare a fizicii.⁷⁷⁷ Amânarea unei decizii filosofice asupra teoriei corzilor pentru după

⁷⁷⁴ Matsubara.

⁷⁷⁵ W. V. Quine, *Ontological Relativity & Other Essays* (New York: Columbia University Press, 1969), 72.

⁷⁷⁶ N. Cartwright și Roman Frigg, „String Theory Under Scrutiny” (2008), 14–15.

⁷⁷⁷ Hedrich, „The Internal and External Problems of String Theory”.

consolidarea programului de cercetare ar putea să conducă la condiții mai adecvate pentru o evaluare.

Marele atu al teoriei este speranța că ea va reuși să unifice cele două teorii aparent incompatibile, cuantică și relativitatea generală, și implicit toate forțele fundamentale, într-o mare teorie unificată. În plus, teoria s-a conformat unei abordări considerate fundamentale în metodologia științifică de Einstein, Duhem, și alții: simplificarea. Teoria corzilor a unificat modelul standard și TGR, fiind în acest sens un model "mai bun" chiar dacă încă nu face predicții.⁷⁷⁸ Greene apreciază și "eleganța" sa.⁷⁷⁹

3.4.2. Anomalii ale teoriei corzilor

Unele dintre predicțiile făcute de teoreticienii corzilor, precum găurile negre microscopice și particulele super-simetrice cu energie scăzută, au fost falsificate prin observație.⁷⁸⁰ Dar aceste probleme nu refutează teoria, deoarece sunt observații indirecte, mai degrabă decât rezultate directe ale teoriei.

În cazul teoriei corzilor, aspectele experimentale sunt dincolo de capacitatea noastră tehnologică.⁷⁸¹ Dar faptul că toate predicțiile teoriei au fost până acum falsificate este o problemă. În plus problema peisajului este o altă problemă care face ca teoria să nu fie falsificabilă. Pentru a rezolva această problemă s-a propus apelarea la principiul antropic, conform căruia putem alege din diferite permutări acele universuri care creează condiții potrivite pentru apariția vieții,⁷⁸² dar acest principiu este controversat.⁷⁸³ O altă problemă ține de materia/energia întunecată, care nu sunt prezise de teoria corzilor.

În momentul în care teoria corzilor și-a schimbat domeniul de aplicare (și în acest context și toate cerințele unui program de cercetare, inclusiv strategia) de la fizica hadronilor la gravitația cuantică, au început să apară problemele interne care, prin încercarea de eliminare a acestora cu ipoteze ad-hoc, au condus la alte probleme

⁷⁷⁸ Hakon Enger, „String Theory and the Scientific Method”, 2003, <http://home.simula.no/~henger/publ/mnvit-essay.pdf>.

⁷⁷⁹ Brian Greene, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*, 2nd ed. edition (New York London: W. W. Norton & Company, 2010), 137.

⁷⁸⁰ Matthias Blau și Stefan Theisen, „String Theory as a Theory of Quantum Gravity: A Status Report”, *General Relativity and Gravitation* 41, nr. 4 (1 aprilie 2009): 743–55, <https://doi.org/10.1007/s10714-008-0752-z>.

⁷⁸¹ Richard P Feynman, „The Feynman Lectures on Physics”, 2013, <http://www.feynmanlectures.caltech.edu/>.

⁷⁸² Verhagen, „Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory”.

⁷⁸³ Lee Smolin, „A perspective on the landscape problem”, *Foundations of Physics* 43, nr. 1 (ianuarie 2013): 21–45, <https://doi.org/10.1007/s10701-012-9652-x>.

interne, rezultând o autoreferențialitate în creștere și o îndepărtare simultană de fenomenologie. Empirismul ei a scăzut încontinuu, rămânând o structură matematică labirintică cu o relevanță fizică neclară.

În plus, prin dezvoltările teoretice s-a ajuns la o autoimunizare a teoriei împotriva verificărilor empirice, inclusiv în cazul supersimetriei.⁷⁸⁴ Teoria corzilor nu face predicții pentru masele particulelor supersimetrice; astfel, dacă viitoarele experimente în acceleratoare nu descoperă aceste particule, se poate argumenta că acestea au mase dincolo de gama dispozitivului experimental.⁷⁸⁵ S-a ajuns astfel ca incapacitatea de a face previziuni cantitative este folosit ca un avantaj strategic pentru auto-imunizare, un aspect inedit în fizică.⁷⁸⁶

Dawid consideră că o confirmare a unei teorii științifice se bazează pe trei factori principali:

1. existența unor soluții alternative la o anumită problemă (teoreticienii corzilor afirmă că teoria lor este singura opțiune viabilă pentru unificare);
2. gradul de conexiune cu teoriile deja confirmate (teoreticienii corzilor consideră programul lor ca o continuare naturală a programului de cercetare a fizicii particulelor);
3. numărul de intuiții/predicții neașteptate.

Încrederea în teorie ar depinde de conformarea cu acești factori, chiar în lipsa unei confirmări empirice. Practic, Dawid sugerează o comutare de la falsificabilitatea empirică la un model bayesian care definește probabilitatea nu "cât de des ceva se întâmplă", ci "ce grad de încredere ar trebui să avem în cunoașterea noastră".

Unii fizicieni propun să se evalueze teorii alternative la teoria corzilor. Principala diferență ar fi că teoria corzilor are ca scop rezolvarea problemei gravitației cuantice în contextul unificării. Din păcate, multe dintre problemele teoriei corzilor rămân și în teoriile alternative. Principalul rival, GCB, nu a fost încă dezvoltat suficient pentru a face declarații falsificabile. Smolin susține alternativele au fost neglijate în mod constant.⁷⁸⁷ Problema alternativelor este că în prezent nu există nicio teorie

⁷⁸⁴ Richard Dawid, „On the Conflicting Assessments of the Current Status of String Theory”, Preprint, aprilie 2008, 984–96, <http://philsci-archive.pitt.edu/4009/>.

⁷⁸⁵ Greene, *The Elegant Universe*.

⁷⁸⁶ Hedrich, „The Internal and External Problems of String Theory”.

⁷⁸⁷ Smolin, *The Trouble With Physics*.

suficient de dezvoltată și consolidată care să ia locul teoriei corzilor.⁷⁸⁸ În căutarea "teoriei tuturor" nu pare să existe altă cale de urmat decât să continuăm să lucrăm la teoria corzilor (argumentul "Nu există alternative."⁷⁸⁹

Un realist științific ar lua în considerare doar o teorie matură bine testată care a prezis fapte noi. Teoria corzilor nu corespunde acestor cerințe. Dualitățile din teoria corzilor întăresc această convingere. Subdeterminarea teoriilor prin date este o problemă care ține de realismul științific. Realistii vor diferenția prin simplitatea, lipsa ad-hock-ului, puterea explicativă, etc, între teorii. Alternativ, se poate argumenta că subdeterminarea implică doar două moduri de a descrie aceeași teorie. Subdeterminarea ar trebui să forțeze realistul științific să abandoneze fie realismul semantic, fie realismul epistemic.⁷⁹⁰

Pozitiviștii logici tradiționali sunt un fel de anti-realisti, considerând că partea cognitivă semnificativă a unei teorii este limitată la conținutul ei empiric. Deci, teoria corzilor nu ar fi acceptată în situația actuală. Dacă teoria corzilor ar avea în viitor un succes empiric, dualitățile ar fi considerate doar ca echivalente semantic, deoarece numai conținutul empiric ar fi considerat ca relevant.

3.5 Alte teorii ale gravitației cuantice

Gravitația bimetrică este o clasă de teorii modificate ale gravitației în care se folosesc doi tensori metrici în loc de unul,⁷⁹¹ a doua metrică putând fi folosită la energii înalte. În cazul în care cele două metrici interacționează, apar două tipuri de gravitoni, unul masiv și unul fără masă. Setul de teorii încearcă să explice gravitația masivă.⁷⁹² Astfel de teorii sunt cele ale lui Nathan Rosen, (1909-1995)⁷⁹³ sau Modified Newtonian Dynamics (MOND) a lui Mordehai Milgrom. Evoluțiile gravitației masive au încurajat apariția de noi teorii consistente ale gravitației bimetrică,⁷⁹⁴ dar niciuna nu reflectat

⁷⁸⁸ Joanes Lizarraga et al., „Fitting BICEP2 with defects, primordial gravitational waves and dust”, *Journal of Physics: Conference Series* 600 (28 aprilie 2015): 600 (2015): 012025, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/600/1/012025>.

⁷⁸⁹ Richard Dawid, Stephan Hartmann, și Jan Sprenger, „The No Alternatives Argument”, Preprint, 24 februarie 2013, 66.1 (2014): 213-234, <http://philsci-archive.pitt.edu/9588/>.

⁷⁹⁰ Matsubara, „Realism, Underdetermination and String Theory Dualities”.

⁷⁹¹ N. Rosen, „General Relativity and Flat Space. I”, *Physical Review* 57, nr. 2 (15 ianuarie 1940): 57 (2): 147–150, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.57.147>.

⁷⁹² S. F. Hassan și Rachel A. Rosen, „Bimetric Gravity from Ghost-Free Massive Gravity”, *Journal of High Energy Physics* 2012, nr. 2 (24 februarie 2012): 1202 (2): 126, [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2012\)126](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2012)126).

⁷⁹³ Rosen, „General Relativity and Flat Space. I”, 57 (2): 147–150.

⁷⁹⁴ Lisa Zyga, „Gravitational Waves May Oscillate, Just like Neutrinos”, 2017, <https://phys.org/news/2017-09-gravitational-oscillate-neutrinos.html>.

observațiile fizice mai bine decât teoria relativității generale.⁷⁹⁵ Unele dintre aceste teorii (MOND, de ex.) sunt alternative la energia întunecată. Alte teorii bimetrice nu iau în considerare gravitonii masivi și nu modifică legea lui Newton, descriind universul ca o varietate de două metrici riemanniene cuplate, unde materia interacționează prin gravitație. Unele din ele stipulează viteza variabilă a luminii la densitate energetică ridicată.⁷⁹⁶

Bigravitația lui Rosen (1940)⁷⁹⁷ propune ca în fiecare punct al spațiu-timpului să existe un tensor metric euclidian în plus față de tensorul metric riemannian. Astfel, în fiecare punct al spațiu-timpului există două valori. Primul tensor metric descrie geometria spațiu-timpului, și deci câmpul gravitațional. Al doilea tensor metric, se referă la spațiu-timpul plat și descrie forțele inerțiale. Bigravitația lui Rosen satisface principiul covarianței și echivalenței. Bigravitația lui Rosen și TGR diferă în cazul propagarea undelor electromagnetice, al câmpului extern al unei stele de înaltă densitate, și în comportamentul undelor gravitaționale intense care se propagă printr-un câmp gravitațional static puternic. Predicțiile radiației gravitaționale din teoria lui Rosen nu fost infirmate de observațiile pulsarului binar Hulse-Taylor.⁷⁹⁸

Bigravitația masivă a apărut în 2010, dezvoltată de Claudia de Rham, Gregory Gabadadze și Andrew Tolley (*dRGT*)⁷⁹⁹ În teoria dRGT apare o "metrică de referință" nondinamică. Valoarea metrică de referință trebuie specificată manual. O extensie ulterioară a fost introdusă de Fawad Hassan și Rachel Rosen.⁸⁰⁰

Gravitația cuantică bohmiană încorporează configurația reală în teorie ca variabila de bază și stipulează că aceasta evoluează într-un mod natural sugerat de simetrie și de ecuația lui Schrodinger.⁸⁰¹ Teoria rezolvă problema timpului (același rol ca în TGR), și parțial problema difeomorfismului. Nu are problemele legate de rolul observatorilor și observabilelor, deoarece aceștia nu joacă niciun rol în această teorie.

⁷⁹⁵ Clifford Will, *The Renaissance of General Relativity, in The New Physics* (Cambridge: Cambridge University Press, 1992), 18.

⁷⁹⁶ J. P. Petit și G. D'Agostini, „Cosmological bimetric model with interacting positive and negative masses and two different speeds of light, in agreement with the observed acceleration of the Universe”, *Modern Physics Letters A* 29, nr. 34 (27 octombrie 2014): 29 (34): 1450182, <https://doi.org/10.1142/S021773231450182X>.

⁷⁹⁷ Rosen, „General Relativity and Flat Space. I”, 57 (2): 147–150.

⁷⁹⁸ Will, *The Renaissance of General Relativity, in The New Physics*, 18.

⁷⁹⁹ Claudia de Rham, Gregory Gabadadze, și Andrew J. Tolley, „Resummation of Massive Gravity”, *Physical Review Letters* 106, nr. 23 (10 iunie 2011): 106 (23): 231101, <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.231101>.

⁸⁰⁰ Hassan și Rosen, „Bimetric Gravity from Ghost-Free Massive Gravity”, 1202 (2): 126.

⁸⁰¹ Sheldon Goldstein și Stefan Teufel, „Quantum spacetime without observers: ontological clarity and the conceptual foundations of quantum gravity”, *arXiv:quant-ph/9902018*, 5 februarie 1999, <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9902018>.

Funcția de undă dependentă de timp, care satisface ecuația lui Schrodinger, nu este necesară aici.

Gravitația cuantică bohmiană implică o tranziție simplă de la mecanica cuantică, încorporând configurația reală în teorie ca variabilă de bază și stipulând că aceasta evoluează într-un mod natural sugerat de simetrie și de ecuația lui Schrodinger.

3.6 Unificarea (Teoria Finală)

Domeniile de aplicabilitate ale TGR și TCC sunt diferite, astfel încât cele mai multe situații necesită folosirea doar a uneia din cele două teorii.⁸⁰² Suprapunerile apar în regiuni de dimensiuni extrem de mici și de masă ridicată, precum gaură neagră sau universul timpuriu (imediat după Big Bang). Acest conflict se presupune că poate fi rezolvat doar unificând gravitația cu celelalte trei interacțiuni, pentru a integra TGR și TCC într-o singură teorie. Teoria corzilor afirmă că la începutul universului (până la 10^{-43} secunde după Big Bang), cele patru forțe fundamentale au fost o singură forță fundamentală. Conform fizicalismului din filosofie, o TF fizică va coincide cu o teorie filosofică finală.

Au fost propuse mai multe teorii unificatoare. Marea unificare presupune existența unei forțe electronucleare. Ultimul pas în unificare ar necesita o teorie care să includă atât mecanica cuantică cât și gravitația prin relativitatea generală ("teoria finală"). După 1990, unii fizicieni consideră că teoria M 11-dimensională, identificată adesea cu una dintre cele cinci teorii ale supercorzilor perturbative, sau uneori cu supergravitația maximal-supersimetrică 11-dimensională, este teoria finală. Ideea teoriei M⁸⁰³ a preluat din ideile teoriei Kaluza-Klein, în care s-a constatat că folosirea unui spațiu-timp 5-dimensional pentru relativitatea generală (cu una din dimensiuni mică) se vede, din perspectiva 4-dimensională, la fel ca relativitatea generală obișnuită împreună cu electrodinamica lui Maxwell. O proprietate importantă a teoriei corzilor este supersimetria sa (versiunea teoriei supercorzilor) care, împreună cu dimensiunile suplimentare, sunt cele două propuneri principale pentru rezolvarea problemei. Dimensiunile suplimentare ar permite gravitației să se răspândească în celelalte dimensiuni, celelalte forțe rămânând limitate într-un spațiu-timp 4-dimensional.

⁸⁰² Carlip, „Quantum Gravity”, 64 (8): 885–942.

⁸⁰³ Weinberg, *Dreams Of A Final Theory*.

Încercările de a folosi gravitația cuantică în bucle (GCB) într-o TF au eșuat, dar adepții acestui program continuă cercetările.⁸⁰⁴

Există încercări de a dezvolta o teorie finală și prin alte teorii, precum teoria sistemelor de fermioni cauzală care conține cele două teorii fizice curente (relativitatea generală și teoria câmpului cuantic) drept cazuri limitative. O altă teorie este cea a seturilor cauzale. Altă propunere este E8 a lui Garrett Lisi, care propune unificarea în cadrul grupului Lie.⁸⁰⁵ Modelul Strand al lui Christoph Schiller încearcă să reflecte simetria gauge a modelului standard al fizicii particulelor, iar o altă versiune implică ER=EPR, care susține că particulele inseparabile sunt legate printr-o gaură de vierme (sau podul Einstein-Rosen).⁸⁰⁶

Jürgen Schmidhuber este pentru TF, afirmând că teoremele de incompletitudine ale lui Gödel⁸⁰⁷ sunt irelevante pentru fizica computațională.⁸⁰⁸ Majoritatea fizicienilor susțin că teorema lui Gödel nu implică imposibilitatea unei TF.⁸⁰⁹ Unii fizicieni, inclusiv Einstein, consideră că nu trebuie confundate modelele teoretice cu adevărata natură a realității, și susțin că aproximările nu vor ajunge niciodată la o descriere completă a realității.⁸¹⁰ O dezbatere filosofică este cu privire la dacă o teorie finală poate să fie numită *legea fundamentală a universului*.⁸¹¹ Adepții TF reducționiste afirmă că teoria reprezintă legea fundamentală. Alt punct de vedere este că legile emergente (precum a doua lege a termodinamicii și teoria selecției naturale) ar trebui considerate la fel de fundamentale, și deci independente.

Numele de "teoria finală" este contrazis de natura probabilistică a predicțiilor mecanicii cuantice, de sensibilitatea la condițiile inițiale, limitările datorate orizonturilor evenimentelor, și alte dificultăți deterministe. Frank Close contrazice ideea de TF susținând că straturile naturii sunt ca niște straturi de ceapă, și numărul

⁸⁰⁴ Sundance Bilson-Thompson et al., „Particle Identifications from Symmetries of Braided Ribbon Network Invariants”, *arXiv:0804.0037 [hep-th]*, 1 aprilie 2008, <http://arxiv.org/abs/0804.0037>.

⁸⁰⁵ A. Garrett Lisi, „An Exceptionally Simple Theory of Everything”, *arXiv:0711.0770 [gr-qc, physics:hep-th]*, 6 noiembrie 2007, <http://arxiv.org/abs/0711.0770>.

⁸⁰⁶ Ron Cowen, „The Quantum Source of Space-Time”, *Nature News* 527, nr. 7578 (19 noiembrie 2015): 527 (7578): 290–293, <https://doi.org/10.1038/527290a>.

⁸⁰⁷ Teoremele de incompletitudine ale lui Gödel sunt două teoreme ale logicii matematice care stabilesc limitări inerente tuturor sistemelor axiomatice, cu excepția celor mai triviale, capabile de aritmetică. Prima teoremă afirmă că orice teorie generată efectiv, capabilă să exprime aritmetica elementară, nu poate fi atât consistentă, cât și completă.

⁸⁰⁸ Jürgen Schmidhuber, „A Computer Scientist's View of Life, the Universe, and Everything. Lecture Notes in Computer Science”, 1997, 201–208, <http://people.idsia.ch/~juergen/everything/>.

⁸⁰⁹ Jürgen Schmidhuber, „Hierarchies of generalized kolmogorov complexities and nonenumerable universal measures computable in the limit”, *International Journal of Foundations of Computer Science* 13, nr. 04 (1 august 2002): 13 (4): 587–612, <https://doi.org/10.1142/S0129054102001291>.

⁸¹⁰ Pais, *Subtle Is the Lord*, cap. 17.

⁸¹¹ Weinberg, *Dreams Of A Final Theory*.

acestor straturi ar putea fi infinit,⁸¹² implicând o serie infinită de teorii fizice. Weinberg⁸¹³ afirmă că devreme ce este imposibil să calculăm precis chiar și un proiectil real în atmosfera Pământului, nu putem vorbi de o TF.

Unificarea nu implică neapărat reducția. Teoria câmpului cuantic și relativitatea generală sunt ele însele teorii unificate. Relativitatea generală este o generalizare gravitațională a teoriei speciale a relativității care a unificat electromagnetismul cu mecanica clasică non-gravitațională, iar teoria câmpului cuantic este o combinație între relativitatea specială și mecanica cuantică. Modelul standard este deseori prezentat ca un exemplu de unificare de succes. În încercarea de unificare a gravitației cu celelalte forțe, gravitația cuantică în bucle este o versiune "minimalistă" (este doar o încercare de cuantizare a relativității generale). Teoria corzilor încearcă să fie "teorie a tuturor", în care un singur tip de interacțiune determină orice alte aspecte ale realității.

Între teoria cuantică și relativitatea generală există probleme de compatibilitate conceptuală în dezvoltarea unei gravitații cuantice: independența de fundal a relativității generale datorită lipsei unui cadru de referință preferat, este opusă geometriei din teoria cuantică care implică o dependență de fond legată de existența unui cadru de referință preferat.⁸¹⁴ Metrica în relativitatea generală determină geometria spațiu-timpului și acționează ca un potențial. Deoarece este o variabilă dinamică, rezultă că geometria însăși este dinamică. Teoria cuantică necesită o geometrie fixă, rezultă un tratament foarte diferit al spațiu-timpului față de TGR. O teorie a gravitației cuantice poate renunța la dependența de fond, sau se poate modifica teoria cuantică.

Conform lui Reiner Hedrich, teoria corzilor este o construcție matematică fără niciun control empiric, care pare să transceadă din ce în ce mai mult contextul fizicii, prin creșterea autoimunizării, devenind în final o formă de metafizică a naturii de inspirație matematică.⁸¹⁵ Întoarcerea la o metafizică a naturii trebuie văzută ca un pas retrograd. Teoria corzilor poate fi înțeleasă ca o reîntoarcere la idealului antic al unei aprofundări a naturii exclusiv prin intermediul intelectului nostru (matematic), fără observații sau dispozitive experimentale. Jeremy Butterfield și Christopher Isham

⁸¹² Frank Close, *The New Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe*, Revised edition (New York: CRC Press, 2006).

⁸¹³ Weinberg, *Dreams Of A Final Theory*.

⁸¹⁴ Weinstein, „Absolute Quantum Mechanics”, 52: 67-73.

⁸¹⁵ Hedrich, „The Internal and External Problems of String Theory”.

subliniază că imensa auto-referință care se găsește în toate teoriile gravitației cuantice este o consecință a inexistenței datelor empirice, a semnificației metafizice a ipotezelor și predispozițiilor, și a aparatului matematic și modelului teoretic pe care sunt concepute teoriile respective.⁸¹⁶

Baza matematică a teoriei corzilor (o versiune extinsă a aparatului teoriei câmpului cuantic) nu s-a schimbat semnificativ în timpul evoluției sale. Au mai existat încercări de unificare a gravitației cu alte forțe pe baze matematice, precum teoriile lui Einstein, Schrodinger, Misner și Wheeler de a unifica geometric gravitația și electromagnetismul, dar și acestea au eșuat.⁸¹⁷ Toți cercetătorii, indiferent dacă sunt adepți sau critici ai Teoriei Finale, încearcă să caute un răspuns la întrebarea de ce nu s-a reușit până acum această unificare. În fond, nu există un consens nici măcar în a defini în ce constă efectiv unificarea, și în ce măsură poate reflecta ea, epistemic, această eventuală unitate ontică. Limitele noastre epistemice ar putea face imposibilă o astfel de explorare.

Practic, filosofiile științei sunt sceptici în ceea ce privește motivațiile filosofice ale acestei unități, și în ceea ce privește succesul ei științific.⁸¹⁸

⁸¹⁶ Butterfield și Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”, 33–89.

⁸¹⁷ Robert Weingard, „A Philosopher Looks at String Theory”, *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 1988 (1988): 95–106.

⁸¹⁸ Nancy Cartwright, *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science* (Cambridge University Press, 1999).

4. Cosmologia

La nivel cosmologic, modelul cosmologic standard conține teoria gravitației lui Einstein ca parte a "nucleului dur". Materia întunecată, energia întunecată, și inflația au fost adăugate teoriei ca răspuns la observații. Niciuna dintre aceste ipoteze auxiliare nu a fost încă confirmată. Modelul cosmologic standard nu are predicții de succes, el este în permanență ajustat în urma observațiilor. Reproducerea spectrului fluctuațiilor de temperatură în mediul cosmic cu microunde este considerat un succes al modelului, dar a fost obținut prin modificarea forțată a parametrilor modelului, cu consecvențe cu valorile determinate în alte moduri mai directe.

David Merritt⁸¹⁹ atrage atenția asupra unui program de cercetare alternativ, care a fost inițiat la începutul anilor 1980 și care a făcut predicții noi; programul lui Mordehai Milgrom (MOND), inițiat în 1983, a cărui principiu specific afirmă că legile gravitației și mișcării diferă de cele ale lui Newton sau Einstein în regimul de accelerare foarte scăzută (la nivel de galaxii). Programul are o lungă listă de alte predicții, evitând ipotezele materiei întunecate și a energiei întunecate.

În cosmologie, metafizica implică un domeniu larg de întrebări dincolo de dovezile empirice, folosind uneori inferența speculativă. Analiza epistemologică în cosmologie ajută la evaluarea modelelor. Studiul filosofic oferă un cadru general pentru interpretarea inferențelor care depășesc știința.⁸²⁰

În cosmologie există câteva principii ontologice care ajută la clasificarea modelelor în funcție de caracteristici, la conceperea realității cosmice într-o descriere mai transparentă, și permit să rezolvăm ecuațiile matematice ca niște construcții centrale ale oricărui model. Aceste principii sunt: ⁸²¹

1. Omogenitatea spațiului (distribuția uniformă a materiei)
2. Omogenitatea timpului (structură independentă de timpul cosmic global)
3. Izotropia spațiului (independența structurii de direcția de observare)
4. Homotetia spațiului (independența structurii de transformările scalare)

⁸¹⁹ David Merritt, „Gravity: The Popper Problem”, IAI TV - Changing how the world thinks, 2 octombrie 2017, <https://iai.tv/articles/gravity-the-popper-problem-auid-899>.

⁸²⁰ Petar V. Grujic, „Some epistemic questions of cosmology”, *arXiv:0709.3191 [physics]*, 20 septembrie 2007, <http://arxiv.org/abs/0709.3191>.

⁸²¹ Grujic.

Astfel, modelul standard (Hot Big Bang) include modelele (a, c), modelul staționar include (a, b, c), modelul ierarhic include (c, d)).

Pentru a evalua epistemic modelele cosmologice, presupunem că legile fizice sunt valabile și aceleași peste tot în cosmos, în spațiu și timp. Izotropia spațiului este singura proprietate a cosmosului ușor de verificat. Deoarece inferența asupra proprietăților și fenomenelor fizice este întotdeauna indirectă și legată de modelele teoretice, dovezile empirice se bazează pe valabilitatea acestor construcții teoretice.⁸²² În estimarea distanțelor cosmice luăm în considerare schimbarea de culoare a liniilor spectrale de la aceste obiecte și ne bazăm pe interpretarea acestei schimbări, atribuită efectului Doppler (cinematic), fenomenelor gravitaționale (dinamic), dilatării spațiului (geometric) etc., în funcție de modelul nostru al universului. În cadrul "spațiului epistemic", principiile ontologice definite (a, b, c) sunt postulate, dar a patra (d) nu mai este valabilă la scări suficient de mici, inclusiv probabil gravitațională. O parte a cosmosului observabil, cosmografia, poate fi privită ca o structură construită pe componente particulare elementare.

Modelele cosmografice încep cu galaxia ca unitate elementară. Cosmologia tratează galaxiile ca puncte fizice, dotate cu mișcări colective (coerente) și proprii (haotice).

În cosmologie, predicțiile teoretice sau descrierile trebuie să fie în concordanță cu dovezile empirice, rezultă că modelele vor fi adaptate la noile situații empirice, sau se pot introduce noi elemente externe în model, cu condiția să nu contrazică structura inițială.⁸²³

Piatra de încercare pentru un model cosmologic este modul în care tratează problema Începutului, inclusiv condițiile inițiale și problema eshatologică. Abordarea abderiană este imună la aceste probleme. În general, o bună teorie include un model matematic formal și procedura de cuplare cu realitatea fizică. Hawking a propus o soluție care are ca scop formularea unui model care este autosuficient.

Astfel, programul de cercetare pentru modelul cosmologic standard este un program unificator în sensul metodologiei programelor de cercetare a lui Lakatos, incluzând mai multe programe unificate (precum cel pentru Big Bang, evoluția stelară și a galaxiilor, singularitățile gravitaționale, etc.). Aceste programe unificate sunt în

⁸²² Grujic.

⁸²³ P. Duhem, „La Théorie Physique, Son Objet Et Sa Structure”, *Revue Philosophique de la France Et de l'Etranger* 61 (1906): 324–327.

același timp subprograme de cercetare ale programului unificator întrucât, chiar dacă sunt create și dezvoltate fără a fi impuse de programul unificator, trebuie să țină cont de cerințele acestuia pentru a fi validate și încadrate în el.

Relativitatea generală a apărut ca un model extrem de reușit pentru gravitație și cosmologie, care a depășit până acum multe teste observaționale și experimentale neechivoce. Cu toate acestea, există indicii puternice că teoria este incompletă.⁸²⁴ Problema gravitației cuantice și chestiunea realității singularităților spațiu-timp rămân deschise. Datele observaționale care sunt luate ca dovadă a energiei întunecate și a materiei întunecate ar putea indica nevoia unei noi fizici. Chiar și așa cum este, relativitatea generală este bogată în posibilități de explorare ulterioară. Relativiștii matematici caută să înțeleagă natura singularităților și proprietățile fundamentale ale ecuațiilor lui Einstein,⁸²⁵ în timp ce relativiștii numerici rulează simulări computerizate din ce în ce mai puternice (cum ar fi cele care descriu găurile negre care fuzionează). Un secol după introducerea sa, relativitatea generală rămâne o zonă de cercetare foarte activă.

⁸²⁴ John Maddox, *What Remains to Be Discovered: Mapping the Secrets of the Universe, the Origins of Life, and the Future of the Human Race*, 1st Touchstone Ed edition (New York: Free Press, 1999), 52–59, 98–122.

⁸²⁵ H. Friedrich, „Is General Relativity ‘Essentially Understood’?”, *Annalen Der Physik* 15, nr. 1–2 (2006): 15 (1–2): 84–108, <https://doi.org/10.1002/andp.200510173>.

Concluzii

Prin această lucrare am dezvoltat reconstrucția rațională a gravitației pe baza metodologiei programului de cercetare a lui Lakatos, de la Newton până în prezent, evidențiind principalele metodologii utilizate în evoluția acestui concept, și tendințele actuale de dezvoltare. Extinderea naturală pe care am propus-o pentru metologia lui Lakatos poate explica cu succes noile evoluții ale fizicii în cazul gravitației cuantice.

Când oamenii de știință formulează și dezvoltă noi teorii, nu au o înțelegere imediată a formalismului teoriei. Descrierea este aproximativă, și referința termenilor lor poate fi vagă.⁸²⁶ Imaginile dezvoltate printr-o teorie au o valoare euristică importantă, care pot sugera posibile extinderi ale teoriei sau pot inspira noi ipoteze. O analiză critică filosofică a istoriei conceptului de gravitație poate ajuta la o mai bună înțelegere a evoluției științei, a modalităților de abordare a acestui concept de-a lungul timpului, și a tendinței și posibilităților actuale.

În opinia lui Lakatos există modalități multiple de a reconstrui istoria, totul depinde de ce se consideră a fi rațional. El propune ca evaluarea acestor teorii să se facă în funcție de cât de bine reușesc să reconstruiască istoria științei păstrând raționalitatea "marii științe": "Toate metodologiile funcționează ca teorii istoriografice (meta-istorice), respectiv programe de cercetare, a căror putere explicativă depinde de reconstrucția istorică rațională pe care o oferă. Astfel, programele de cercetare sunt criterii normative pentru raționalitatea științifică."⁸²⁷

Empirismul standard, din care face parte și metodologia programelor de cercetare a lui Lakatos afirmă că în știință toate teoriile trebuie evaluate imparțial cu privire la dovezi, simplitate, unitate sau putere explicativă. Unele versiuni ale empirismului standard dau simplității și puterii explicative un rol mai important decât alte versiuni. Planck remarcă la un moment dat că: "Experimentele sunt singurele mijloace de cunoaștere pe care le avem la dispoziție. Restul este poezie, imaginație,"⁸²⁸ iar Poincare⁸²⁹ spunea că "Experimentul este singura sursă de adevăr. Numai el ne poate învăța ceva nou; este singurul care ne poate da certitudine."

⁸²⁶ Matsubara, „Realism, Underdetermination and String Theory Dualities”.

⁸²⁷ Sfetcu, „Reconstrucția Rațională a Științei Prin Programe de Cercetare”.

⁸²⁸ Peter W. Atkins și Ronald S. Friedman, *Molecular Quantum Mechanics*, 5 edition (Oxford ; New York: Oxford University Press, 2010), xiv.

⁸²⁹ Henri Poincare, *Science and Hypothesis* (CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012), 140.

Lakatos, conform lui Larry Laudan, afirmă că metodologul nu poate spune oamenilor de știință ce teorii să respingă sau să accepte, renunțând la forța prescriptivă a metodologiei.⁸³⁰ Dar, spune Laudan, nu trebuie să se renunțe la întreprinderea metodologică. Doctrina adoptată de Lakatos este cea a raționalității, conform căreia majoritatea oamenilor de știință au făcut alegeri teoretice în mod rațional: "Dacă propunem o teorie pentru a rezolva o contradicție între o teorie anterioară și o contra-exemplificare, astfel încât noua teorie, în loc să ofere o *explicație* (științifică) în creștere a conținutului, oferă doar o *reinterpretare* a conținutului descrescător (lingvistic) contradicția este rezolvată într-un mod pur și simplu semantic, neștiințific. *Un anumit fapt este explicat științific numai dacă se explică și un nou fapt.*"⁸³¹

Keizo Matsubara concludă că "dacă este posibil să se găsească dualități între formulări aparent foarte diferite în cadrul unui program de cercetare, ar trebui să recunoaștem că este posibil să nu fie adecvat să studiem doar un program de cercetare. Ostilitatea care a apărut din când în când între susținătorii diferitelor programe de cercetare în gravitația cuantică ar putea fi o greșeală gravă. Dacă ar fi găsită un fel de dualitate între programele de cercetare, atunci ar putea fi unificate. O sugestie metodologică generală poate fi dată în sensul că numai dacă un program de cercetare este progresiv empiric, ar fi rațional să fie continuat. Atunci când un program teoretic de cercetare nu produce rezultate empirice, atunci ar trebui adoptată o perspectivă mai largă."⁸³²

Proliferarea fără precedent a teoriilor gravitației impune o abordare metodologică adecvată, care să permită relaționări logice între aceste teorii prin care să se poată explica motivația apariției lor, modalitățile lor de dezvoltare, și să se poată evalua tendințele viitoare de dezvoltare. În acest sens, consider că metodologia lui Lakatos are suficientă flexibilitate și logică pentru a aborda toate aceste aspecte. Extensia pe care am propus-o prin programe bifurcate și programe unificatoare permite explicarea la nivel metodologic și prin prisma raționalității științifice a acestei proliferări de teorii post-einsteinienne și gravitație cuantică.

Einstein poate fi cel mai bine înțeles prin prisma concepțiilor sale despre geometrie și fizică: "geometria axiomatică" trebuie completată cu afirmații privind

⁸³⁰ Larry Laudan, „Progress or Rationality? The Prospects for Normative Naturalism”, *American Philosophical Quarterly* 24, nr. 1 (1987): 19–31.

⁸³¹ Lakatos, *The Methodology of Scientific Research Programmes*, 34.

⁸³² Matsubara, „Realism, Underdetermination and String Theory Dualities”.

comportamentul obiectelor, aceasta fiind o știință naturală pe care Einstein o numește "geometrie practică"; astfel, măsurătorile de lungime reprezintă o geometrie practică:

"Apreciez ca având o importanță deosebită această viziune a geometriei, pentru că fără ea n-ar fi trebuit să formulaz teoria relativității. Fără ea, următoarea reflecție ar fi fost imposibilă; într-un sistem de referință care se rotește relativ la un sistem inerțial, legile dispunerii corpurilor rigide nu corespund regulilor geometriei euclidiene din cauza contracției Lorentz; astfel încât, dacă admitem sisteme non-inerțiale pe picior de egalitate, trebuie să abandonăm geometria euclidiană. Fără interpretarea de mai sus, cu siguranță nu s-ar fi ajuns în etapa decisivă în tranziția către ecuații general covariante."⁸³³

Pentru Einstein, eterul și spațiul și timpul absolut au fost inutile sau necorespunzătoare. Spre deosebire de Einstein care a atribuit proprietăți sau stări spațiului, fizicienii sec. 18 și 19 nu puteau concepe așa ceva, astfel încât au inventat eterul care să preia aceste atribute. Einstein a revoluționat conceptele de spațiu, timp și materie, printr-o abordare relațională a fizicii.

Toate legile fizice se bazează pe o anumită geometrie spațiu-timp. În acest sens, există trei tipuri fundamentale de structuri geometrice : topologie, conexiune și metrică. Topologia abordează apropierea punctelor sau evenimentelor, limite, continuitate, conexiune și concepte conexe. Conexiunea este o prescripție a transportului paralel al vectorilor (și tensorilor) de-a lungul curbelor, și deci compararea câmpurilor vectoriale în diferite puncte pentru a forma derivați (covarianți) și ecuații diferențiale. Metrica atribuie produse interioare vectorilor, lungimilor, iar în teoriile relativiste determină structura conurilor luminoase și relațiile cauzale.⁸³⁴ În teoria lui Einstein, conexiunea și metrica - și structurile determinate de acestea, precum curbura - reprezintă câmpul gravitațional, rezultând că acesta face parte din structura dinamică a geometriei spațiu-timp.

Conform lui Clifford, variația curburii spațiu-timpului determină mișcarea materiei, și deci teoria relativității generale explică gravitația în termeni de curbura geometrică a spațiu-timpului.⁸³⁵ ⁸³⁶ Luciano Boi afirmă că din punct de vedere filosofic și științific, cea mai importantă descoperire a lui Einstein este că modul în care se comportă câmpul gravitațional depinde de natura geometriei care caracterizează spațiul-timpul.

⁸³³ Einstein, *Geometrie und Erfahrung*, 235.

⁸³⁴ Luciano Boi, „Theories of Space-Time in Modern Physics”, *Synthese* 139, nr. 3 (2004): 429–489.

⁸³⁵ Wheeler, „On the nature of quantum geometrodynamics”.

⁸³⁶ Luciano Boi, *Le problème mathématique de l'espace : Une quête de l'intelligible*, 1995 ed. (Berlin ; New York: Springer, 1995).

Keizo Matsubara afirmă existența dualităților în contextul teoriei corzilor poate fi interpretată corect doar dacă sunt clarificate anumite aspecte semantice.⁸³⁷ Argumentele despre dualitatea corzilor par să fie compatibile cu o anumită formă de realism structural. Teoreticienii corzilor nu cred că descrierile duale dau naștere unor alternative reale. Ei se bazează pe pragmatism. Astfel, în anumite situații o descriere este mai bună decât alta. Dar aceasta este valabil din punctul de vedere al calculelor. Fizicienii nu înțeleg dualitățile ca susținând o viziune în care totul dintr-o formulare teoretică este considerat literal adevărat, nici măcar tentativ. Deși majoritatea fizicienilor înțeleg dualitățile similar cu RSO, sunt posibile și opinii alternative.

În cazul dualităților din teoria corzilor, acestea neagă realismul semantic, dar în alte situații teoreticienii corzilor au optat pentru o înțelegere realistă, precum în cazul "peisajului" din teoria corzilor, în care apare ideea unui univers paralel și real. Astfel, teoreticienii corzilor trebuie să balanseze între realism și antirealism în atitudinea lor față de construcțiile lor teoretice, acceptând de multe ori un realism intermediar, o versiune a realismului structural, mai exact RSO.⁸³⁸ Cu această idee este de acord și Dawid⁸³⁹ care afirmă că dualitățile pot submina o viziune care le ia în serios

Erik Curiel⁸⁴⁰ a comparat preferința actuală pentru gravitația cuantică cu cea pentru modelul metodologic ipotetico-deductiv din secolului 17, când în loc să fie analizat critic s-a optat doar pentru exprimarea entuziasmului pentru posibilitățile sale viitoare. El consideră că o astfel de atitudine dăunează științei.

Se speră ca în viitorul nu prea îndepărtat, energiile generate de LHC vor fi suficiente pentru a testa aspecte ale gravitației cuantice, precum dimensiunile suplimentare, supersimetria, comportamentul găurii negre microscopice, etc. Dacă supersimetria se verifică, acesta ar putea fi un "test crucial" pentru refutarea sau păstrarea teoriei corzilor, dar nu pentru confirmarea ei.

Sean Lorenz ajunge la o concluzie simplă în privința gravitației cuantice: "Pur și simplu nu știm încă." ⁸⁴¹ El consideră că este greșită cuantificarea teoriei generale. Un motiv ar fi spațiu-timpul, care în teoria corzilor sfidează simplitatea ontologică în favoarea consistenței matematice.

⁸³⁷ Matsubara, „Realism, Underdetermination and String Theory Dualities”.

⁸³⁸ Matsubara.

⁸³⁹ Dawid, „Scientific Realism in the Age of String Theory”.

⁸⁴⁰ Curiel, „Against the Excesses of Quantum Gravity”.

⁸⁴¹ Sean Lorenz, „A Cautious Ontology of Spacetime in Quantum Gravity”, ResearchGate, 2015, https://www.researchgate.net/publication/268296604_A_CAUTIOUS_ONTOLOGY_OF_SPACETIME_IN_QUANTUM_GRAVITY.

O teorie a gravitației cuantice obținută din teoria câmpului cuantic al modelului standard combinată cu teoria generală a relativității este dificil de realizat, în special pentru explicarea unor aspecte care implică gravitația puternică (universul timpuriu, singularitățile gravitaționale). Curiel afirmă că atâta timp cât nu există rezultate empirice care să infirme o teorie aceasta rămâne viabilă,⁸⁴² dar o teorie care nu confirmă empiric pe termen lung își pierde credibilitatea.

O altă problemă ține într-un fel de așa-numita *problemă a peisajului*, un punct de vedere larg dezbătut în teoria corzilor: multe din constantele fundamentale ale naturii sunt rezultatul unor moduri în care pot fi pliate varietățile Calabi-Yau,⁸⁴³ existând peste 10500 de modele standard diferite cu valori diferite⁸⁴⁴ ⁸⁴⁵ Astfel, experimentele care par să contrazică predicțiile teoriei corzilor pot fi respinse ca o permutare greșită. O soluție propusă dar controversată este să se reducă numărul de universuri doar la cele locuibile, în acest fel constantele fundamentale ale universului fiind rezultatul principiului antropic, mai degrabă decât cele deduse din teorie.⁸⁴⁶ Numărul mare de permutări face ca testarea tuturor versiunilor să presupună un efort nerealistic. Astfel, teoria corzilor s-a auto-imunizat împotriva refutărilor din astfel de experimente, și a ajuns să fie privită ca pseudoștiință de unii cercetători

Rosenfeld fost primul care a încercat să construiască o teorie a gravitației cuantice (în 1930), dar a renunțat ulterior din cauza lipsei dovezilor experimentale privind efectele cuantice ale gravitației.⁸⁴⁷ Rosenfeld a negat necesitatea acesteia, și a susținut că analogia dintre câmpul gravitațional și cel electromagnetic nu este convingătoare, sfîrmînd că ”necesitatea ultimă de a cuantifica câmpul electromagnetic (sau orice alt câmp) nu poate fi fondată decât pe experiență.”⁸⁴⁸ Rosenfeld pare să fi fost de acord cu viziunea lui Bohr asupra unității fizicii, conform căreia gravitația cuantică nu poate fi o teorie finală din care să rezulte fizica clasică (și fenomenele clasice).

⁸⁴² Curiel, „Against the Excesses of Quantum Gravity”.

⁸⁴³ Disalle, „Spacetime Theory as Physical Geometry”.

⁸⁴⁴ Leonard Susskind, „Lecture Collection | Topics in String Theory (Winter 2011)”, YouTube, 2011, <http://www.youtube.com/playlist?list=PL3E633552E58EB230>.

⁸⁴⁵ Adams et al., „Things Fall Apart”, 347.

⁸⁴⁶ Smolin, *The Trouble With Physics*.

⁸⁴⁷ L. Rosenfeld, „On quantization of fields”, *Nuclear Physics* 40 (1 februarie 1963): 442–44, [https://doi.org/10.1016/0029-5582\(63\)90279-7](https://doi.org/10.1016/0029-5582(63)90279-7).

⁸⁴⁸ Rosenfeld, 443.

Scepticii consideră că TGR și TCC, deși nu sunt incompatibile într-un sens logic, sunt fundamental incompatibile ca "teorii incommensurabile",⁸⁴⁹ pentru că "în conformitate cu TGR, gravitația pur și simplu nu este o forță."⁸⁵⁰ Unii bănuiesc că numai strategiile interne ale fizicii (de exemplu, generalizarea inductivă, extinderea domeniului unei teorii stabilite sau exploatarea capacităților explicative ale unei teorii stabilite) nu sunt suficiente pentru a susține astfel de programe. Dar fizicienii folosesc argumente externe, de exemplu o "dogmă a unificării",⁸⁵¹ folosind principiile metafizice (de exemplu, "unitatea naturii"), principii metateoretice (de exemplu, "economia gândirii") sau principiile epistemologice (de exemplu, unificarea de dragul său, eliminarea dualismului teoretic), respectiv motive filosofice.^{854 855 856}

Unii cercetători susțin că teorema incompletenei lui Gödel implică faptul că nu este posibilă construirea unei TF, idee susținută și de Stanley Jaki⁸⁵⁷ și Freeman Dyson: "teorema lui Gödel presupune că matematica pură este inepuizabilă, indiferent de cât de multe probleme rezolvăm, vor exista întotdeauna alte probleme care nu pot fi rezolvate în cadrul regulilor existente [...] Din cauza teoremei lui Gödel, fizica este de asemenea inepuizabilă. Legile fizicii sunt un set finit de reguli și includ regulile pentru matematică, astfel încât teorema lui Gödel se aplică acestora."⁸⁵⁸ Stephen Hawking, deși inițial a crezut în TF, după ce a analizat teorema lui Gödel s-a răzgândit: "Unii oameni vor fi foarte dezamăgiți dacă nu există o teorie supremă, care poate fi formulată ca număr finit de principii. Am aparținut acelei tabere, dar m-am răzgândit."⁸⁵⁹

Există și oameni de știință care se întreabă cum ar putea fi concepută relația dintre relativitatea generală și teoria cuantică dacă câmpul gravitațional nu este cuantificat.⁸⁶⁰ "Întrebarea întrebării" este dacă un astfel de model ar fi relevant (experimental și observațional). Rosenfeld⁸⁶¹ a susținut că într-un astfel de caz este mai

⁸⁴⁹ Wuthrich, „To quantize or not to quantize”, 778.

⁸⁵⁰ Maudlin, „On the Unification of Physics”, 129–144.

⁸⁵¹ Wuthrich, „To quantize or not to quantize”, 777–788.

⁸⁵² Maudlin, „On the Unification of Physics”, 129–144.

⁸⁵³ James Mattingly, „Is Quantum Gravity Necessary?”, în *The Universe of General Relativity*, ed. A. J. Kox și Jean Eisenstaedt, Einstein Studies (Birkhäuser Boston, 2005), 327–38.

⁸⁵⁴ Salimkhani, „Quantum Gravity”.

⁸⁵⁵ Wuthrich, „To quantize or not to quantize”, 777–788.

⁸⁵⁶ Mattingly, „Is Quantum Gravity Necessary?”, 327–338.

⁸⁵⁷ Stanley L. Jaki, *The Relevance of Physics*, First Edition edition (Chicago: University Of Chicago Press, 1966), 127–130.

⁸⁵⁸ Freeman Dyson, „The World on a String”, 13 mai 2004, <https://www.nybooks.com/articles/2004/05/13/the-world-on-a-string/>.

⁸⁵⁹ Stephen Hawking, „Gödel and the End of Physics”, 2003, <https://www.caltech.edu/campus-life-events/master-calendar/stephen-hawking-goumdel-and-the-end-of-physics>.

⁸⁶⁰ Butterfield și Isham, „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”, 57.

⁸⁶¹ Rosenfeld, „On quantization of fields”, 442–44.

bine să rămânem cu gravitația semi-clasică, care combină o descriere clasică a câmpului gravitațional cu un tratament cuantic al tuturor celorlalte câmpuri de forță și materie. În acest caz, nu ar mai fi nevoie de gravitația cuantică. Callender și Huggett comentează în acest sens:

”O altă poziție filosofică, ... ar putea susține în acest context că relativitatea generală descrie anumite aspecte ale lumii, și mecanica cuantică alte aspecte distincte, și asta ar fi tot. Conform acestei concepții, fizica (și într-adevăr, știința) nu trebuie să ofere o singură teorie universală care să cuprindă toate fenomenele fizice. Nu vom dezbate corectitudinea acestui punct de vedere aici, ci am dori să subliniem că, dacă fizica aspiră să ofere o imagine completă a lumii, așa cum este ea tradițională, atunci trebuie să existe o teorie cuantică a gravitației [în sensul general al o legătură între relativitatea generală și teoria cuantică]. Motivul simplu este că relativitatea generală și mecanica cuantică nu pot fi ambele corecte [în aceleași domenii de aplicabilitate].”⁸⁶²

Aceștia susțin că cele două teorii "... nu pot fi ambele universale în sfera de cuprindere, pentru că cea din urmă prevede strict că toată materia este cuantică, iar prima descrie numai efectele gravitaționale ale materiei clasice.” Cu toate succesele empirice impresionante ale teoriei cuantice, aceasta nu prezice că toată materia este cuantificată. Aceasta rezultă doar prin adoptarea unei interpretări ontologice a teoriei cuantice. În opinia lui Bohr, această idee poate rezista în măsura în care obiectele nu sunt nici cuantice, nici clasice (chiar dacă în cazuri particulare apare o anumită predispoziție).

O problemă specială în favoarea decuplării celor două teorii este problema constantei cosmologice: în timp ce teoria câmpului cuantic prezice o valoare ridicată astronomic (indicarea unei curburi extreme a spațiu-timpului), un observator va constata că spațiu-timpul este plat, sau aproape plat. Problema constantei cosmologice este considerată de Weinberg⁸⁶³ ca fiind o "adevărată criză" pentru fizica fundamentală. Ea sugerează că înțelegerea noastră a legăturii dintre relativitatea generală și teoria câmpului cuantic este (deocamdată) prematură pentru a avea încredere în extrapolări în regimul energiei înalte.⁸⁶⁴

Richard Dawid susține că teoria corzilor este un nou tip de teorie științifică, care depășește sfera actuală a științei bazată pe experimente. El sugerează că fizica experimentează schimbări meta-paradigmatice în care teoriile moderne o iau cu mult

⁸⁶² Callender și Huggett, *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*, 4.

⁸⁶³ Steven Weinberg, „The cosmological constant problem”, *Reviews of Modern Physics* 61, nr. 1 (1 ianuarie 1989): 1–23, <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.61.1>.

⁸⁶⁴ Zinkernagel, „The Philosophy Behind Quantum Gravity”.

înaintea capacităților experimentale, fiind necesară o nouă metodă științifică pentru a stabili valabilitatea teoriilor.⁸⁶⁵

Dar este posibil ca fizica la scara Planck să fie până la urmă descrisă cu succes de o teorie care să nu aibă nicio legătură cu actuala teorie a corzilor sau cu orice altă abordare existentă a gravitației cuantice):

”[...] natura este mult mai nebunesc la scara Planck decât ar fi putut imagina chiar teoreticienii corzilor.”⁸⁶⁶

”[...] este puțin probabil ca o teorie finală a gravitației cuantice - dacă într-adevăr există - să arate ca oricare dintre teoriile actuale candidate, fie ea teoria corzilor, gravitația canonică, sau alte abordări.”⁸⁶⁷

Revoluția în fizica gravitației rămâne incompletă. Este o problemă care, dacă va fi rezolvată, va schimba fundamental modul în care gândim lumea.

⁸⁶⁵ Dawid, „On the Conflicting Assessments of the Current Status of String Theory”, 984–96.

⁸⁶⁶ G. 't Hooft, „Dimensional Reduction in Quantum Gravity”, *arXiv:gr-qc/9310026*, 19 octombrie 1993, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9310026>.

⁸⁶⁷ Weinstein și Rickles, „Quantum Gravity”.

Bibliografie

- Abbott, B. P., The LIGO Scientific Collaboration, și the Virgo Collaboration. „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger”. *Physical Review Letters* 116, nr. 6 (11 februarie 2016): 061102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.
- Abbott, B. P., LIGO Scientific and Virgo Collaborations, M. R. Abernathy, F. Acernese, K. Ackley, C. Adams, T. Adams, et al. „Tests of General Relativity with GW150914”. *Physical Review Letters* 116, nr. 22 (31 mai 2016): 221101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.221101>.
- Abuter, R., A. Amorim, N. Anugu, M. Bauböck, M. Benisty, J. P. Berger, N. Blind, et al. „Detection of the Gravitational Redshift in the Orbit of the Star S2 near the Galactic Centre Massive Black Hole”. *Astronomy & Astrophysics* 615 (1 iulie 2018): L15. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833718>.
- Adams, A., X. Liu, J. McGreevy, A. Saltman, și E. Silverstein. „Things Fall Apart: Topology Change from Winding Tachyons”. *Journal of High Energy Physics* 2005, nr. 10 (11 octombrie 2005): 033–033. <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2005/10/033>.
- Adams, John Couch. „On the Perturbations of Uranus (1841-1846). | StJohns”, 1846. <https://www.joh.cam.ac.uk/w16-manuscripts-john-couch-adams-perturbations-uranus-1841-1846>.
- Ade, P. a. R., N. Aghanim, M. Arnaud, F. Arroja, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, et al. „Planck 2015 Results - XX. Constraints on Inflation”. *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octombrie 2016): A20. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525898>.
- Ade, P. a. R., N. Aghanim, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, A. J. Banday, et al. „Planck 2015 Results - XIII. Cosmological Parameters”. *Astronomy & Astrophysics* 594 (1 octombrie 2016): A13. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525830>.
- Adler, R., et al., J. Ellis, J. Lopez, N. Mavromatos, și D. Nanopoulos. „Test of CPT Symmetry and Quantum Mechanics with Experimental data from CPLEAR”. *Physics Letters B* 364, nr. 4 (decembrie 1995): 239–45. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(95\)01416-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(95)01416-0).
- Adunas, G. Z., E. Rodriguez-Milla, și D. V. Ahluwalia. „Probing Quantum Aspects of Gravity”. *Physics Letters B* 485, nr. 1–3 (iulie 2000): 215–23. [https://doi.org/10.1016/S0370-2693\(00\)00697-3](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(00)00697-3).
- Aiton, E. J. *Vortex Theory of Planetary Motions*. First Edition edition. London; New York: American Elsevier Publishing Co., Inc., 1972.
- Akhmedov, Emil T., Stephen James Minter, Piero Nicolini, și Douglas Singleton. „Experimental Tests of Quantum Gravity and Exotic Quantum Field Theory Effects”. ResearchGate, 2014. https://www.researchgate.net/publication/274948108_Experimental_Tests_of_Quantum_Gravity_and_Exotic_Quantum_Field_Theory_Effects.
- Alfaro, Jorge, Hugo A. Morales-Tecotl, și Luis F. Urrutia. „Quantum gravity corrections to neutrino propagation”. *Physical Review Letters* 84, nr. 11 (13 martie 2000): 2318–21. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.2318>.
- Alvåger, T., F. J. M. Farley, J. Kjellman, și L. Wallin. „Test of the second postulate of special relativity in the GeV region”. *Physics Letters* 12, nr. 3 (1 octombrie 1964): 260–62. [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(64\)91095-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91095-9).

- Amelino-Camelia, Giovanni. „Are we at the dawn of quantum-gravity phenomenology?” *arXiv:gr-qc/9910089*, 25 octombrie 1999.
<http://arxiv.org/abs/gr-qc/9910089>.
- Ananthaswamy, Anil. „Swiss-Cheese Model of the Cosmos Is Full of Holes”. *New Scientist*, 2008. <https://www.newscientist.com/article/mg20026783-800-swiss-cheese-model-of-the-cosmos-is-full-of-holes/>.
- Anderson, Warren G. „Black Hole Information Loss”, 1996.
http://math.ucr.edu/home/baez/physics/Relativity/BlackHoles/info_loss.html.
- Archibald, Anne M., Nina V. Gusinskaia, Jason W. T. Hessels, Adam T. Deller, David L. Kaplan, Duncan R. Lorimer, Ryan S. Lynch, Scott M. Ransom, și Ingrid H. Stairs. „Universality of Free Fall from the Orbital Motion of a Pulsar in a Stellar Triple System”. *Nature* 559, nr. 7712 (iulie 2018): 73.
<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0265-1>.
- Arkani-Hamed, Nima. „The Future of Fundamental Physics”, 2012, 14.
- Arnowitt, R., S. Deser, și C. W. Misner. „The Dynamics of General Relativity”. *General Relativity and Gravitation* 40, nr. 9 (septembrie 2008): 1997–2027.
<https://doi.org/10.1007/s10714-008-0661-1>.
- Aron, Jacob. „Earth’s Mantle Helps Hunt for Fifth Force of Nature”. *New Scientist*, 2013. <https://www.newscientist.com/article/dn23202-earths-mantle-helps-hunt-for-fifth-force-of-nature/>.
- Ashby, Neil. „Relativity in the Global Positioning System”. *Living Reviews in Relativity* 6, nr. 1 (28 ianuarie 2003): 1. <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1>.
- Ashtekar, Abhay. „Loop quantum gravity: four recent advances and a dozen frequently asked questions”. În *The Eleventh Marcel Grossmann Meeting*, 126–47. World Scientific Publishing Company, 2008.
https://doi.org/10.1142/9789812834300_0008.
- . „New Variables for Classical and Quantum Gravity”. *Physical Review Letters* 57, nr. 18 (3 noiembrie 1986): 2244–47.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.2244>.
- Ashtekar, Abhay, și Martin Bojowald. „Quantum geometry and the Schwarzschild singularity”. *Classical and Quantum Gravity* 23, nr. 2 (21 ianuarie 2006): 391–411. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/2/008>.
- Ashtekar, Abhay, Luca Bombelli, și Alejandro Corichi. „Semiclassical States for Constrained Systems”. *Physical Review D*, 2005.
https://www.academia.edu/587754/Semiclassical_states_for_constrained_systems.
- Ashtekar, Abhay, și Jerzy Lewandowski. „Background Independent Quantum Gravity: A Status Report”. *Classical and Quantum Gravity* 21, nr. 15 (7 august 2004): R53–152. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/21/15/R01>.
- Atkins, Peter W., și Ronald S. Friedman. *Molecular Quantum Mechanics*. 5 edition. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2010.
- Audretsch, Jürgen. „Quantum Gravity and the Structure of Scientific Revolutions”. *Zeitschrift Für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 12, nr. 2 (1 septembrie 1981): 322–39. <https://doi.org/10.1007/BF01801202>.
- Avgoustidis, A., G. Luzzi, C. J. A. P. Martins, și A. M. R. V. L. Monteiro. „Constraints on the CMB Temperature-Redshift Dependence from SZ and Distance Measurements”. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, nr. 02 (februarie 2012): 013–013. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/02/013>.

- Balbinot, Roberto, și Alessandro Fabbri. „Amplifying the Hawking signal in BECs”. *Advances in High Energy Physics* 2014 (2014): 1–8.
<https://doi.org/10.1155/2014/713574>.
- Ball, Philip. „Black Holes «Do Not Exist»”. *Nature*, 31 martie 2005, news050328-8.
<https://doi.org/10.1038/news050328-8>.
- Banks, T., W. Fischler, S. H. Shenker, și L. Susskind. „M theory as a matrix model: A conjecture”. *Physical Review D* 55, nr. 8 (15 aprilie 1997): 5112–28.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.55.5112>.
- Barack, Leor, și Curt Cutler. „LISA capture sources: Approximate waveforms, signal-to-noise ratios, and parameter estimation accuracy”. *Physical Review D* 69, nr. 8 (30 aprilie 2004): 082005. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.69.082005>.
- Barrett, John W., și Louis Crane. „Relativistic spin networks and quantum gravity”. *Journal of Mathematical Physics* 39, nr. 6 (iunie 1998): 3296–3302.
<https://doi.org/10.1063/1.532254>.
- Barstow, M. A., Howard E. Bond, J. B. Holberg, M. R. Burleigh, I. Hubeny, și D. Koester. „Hubble Space Telescope Spectroscopy of the Balmer Lines in Sirius B”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 362, nr. 4 (1 octombrie 2005): 1134–42. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.09359.x>.
- Bartlett, D. F., și Dave Van Buren. „Equivalence of active and passive gravitational mass using the moon”. *Physical Review Letters* 57, nr. 1 (7 iulie 1986): 21–24.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.57.21>.
- Becker, Katrin, Melanie Becker, și John H. Schwarz. *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2007.
- Beisbart, Claus. „Can We Justifiably Assume the Cosmological Principle in Order to Break Model Underdetermination in Cosmology?” *Journal for General Philosophy of Science* 40, nr. 2 (1 decembrie 2009): 175–205.
<https://doi.org/10.1007/s10838-009-9098-9>.
- Bekenstein, J., și M. Milgrom. „Does the Missing Mass Problem Signal the Breakdown of Newtonian Gravity?” *The Astrophysical Journal* 286 (noiembrie 1984): 7–14. <https://doi.org/10.1086/162570>.
- Bekenstein, Jacob D. „Relativistic gravitation theory for the MOND paradigm”. *Physical Review D* 71, nr. 6 (14 martie 2005): 069901.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.71.069901>.
- Bell, J. S. „On the Einstein Podolsky Rosen paradox”. *Physics Physique Fizika* 1, nr. 3 (1 noiembrie 1964): 195–200.
<https://doi.org/10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195>.
- Bernal, J. D. *Science in History J. D. Bernal*. 3rd edition. M.I.T Press, 1965.
- Bertone, Gianfranco, Dan Hooper, și Joseph Silk. „Particle dark matter: evidence, candidates and constraints”. *Physics Reports* 405, nr. 5 (1 ianuarie 2005): 279–390. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2004.08.031>.
- Bertschinger, Edmund. „Cosmological Perturbation Theory and Structure Formation”. *arXiv:astro-ph/0101009*, 31 decembrie 2000.
<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0101009>.
- Bilson-Thompson, Sundance, Jonathan Hackett, Lou Kauffman, și Lee Smolin. „Particle Identifications from Symmetries of Braided Ribbon Network Invariants”. *arXiv:0804.0037 [hep-th]*, 1 aprilie 2008.
<http://arxiv.org/abs/0804.0037>.
- Birkhoff, George D. „Matter, Electricity and Gravitation in Flat Space-Time”. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 29, nr. 8 (1 august 1943): 231–39. <https://doi.org/10.1073/pnas.29.8.231>.

- Bīrūnī, Muḥammad ibn Aḥmad. „Alberuni's India". Text, 1910.
http://www.columbia.edu/cu/lweb/digital/collections/cul/texts/ldpd_5949073_001/index.html.
- Bize, S., S. A. Diddams, U. Tanaka, C. E. Tanner, W. H. Oskay, R. E. Drullinger, T. E. Parker, et al. „Testing the stability of fundamental constants with the 199Hg+ single-ion optical clock". *Physical Review Letters* 90, nr. 15 (18 aprilie 2003): 150802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150802>.
- Blake, Chris, Shahab Joudaki, Catherine Heymans, Ami Choi, Thomas Erben, Joachim Harnois-Deraps, Hendrik Hildebrandt, et al. „RCSLenS: Testing Gravitational Physics through the Cross-Correlation of Weak Lensing and Large-Scale Structure". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, nr. 3 (1 martie 2016): 2806–28. <https://doi.org/10.1093/mnras/stv2875>.
- Blanchet, Luc, și Jerome Novak. „Testing MOND in the Solar System". *arXiv:1105.5815 [astro-ph, physics:gr-qc]*, 29 mai 2011.
<http://arxiv.org/abs/1105.5815>.
- Blandford, R. D. „Astrophysical black holes." În *Three Hundred Years of Gravitation*, 277–329, 1987. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..277B>.
- Blau, Matthias, și Stefan Theisen. „String Theory as a Theory of Quantum Gravity: A Status Report". *General Relativity and Gravitation* 41, nr. 4 (1 aprilie 2009): 743–55. <https://doi.org/10.1007/s10714-008-0752-z>.
- Bohm, David. *Quantum Theory*. Revised ed. edition. New York: Dover Publications, 1989.
- Bohr, N. „Über die Serienspektren der Elemente". *Zeitschrift für Physik* 2, nr. 5 (1 octombrie 1920): 423–69. <https://doi.org/10.1007/BF01329978>.
- Boi, Luciano. *Le problème mathématique de l'espace : Une quête de l'intelligible*. 1995 ed. Berlin ; New York: Springer, 1995.
- . „Theories of Space-Time in Modern Physics". *Synthese* 139, nr. 3 (2004): 429–489.
- Bollert, Karl. *Einstein's Relativitätstheorie und ihre Stellung im System der Gesamterfahrung*. T. Steinkopf, 1921.
- Born, Max. *Einstein's Theory of Relativity*. Revised edition edition. New York: Dover Publications Inc., 1962.
- Bouman, K. L., M. D. Johnson, D. Zoran, V. L. Fish, S. S. Doeleman, și W. T. Freeman. „Computational Imaging for VLBI Image Reconstruction". În *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 913–22, 2016. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.105>.
- Bozza, Valerio. „Gravitational Lensing by Black Holes". *General Relativity and Gravitation* 42, nr. 9 (1 septembrie 2010): 2269–2300.
<https://doi.org/10.1007/s10714-010-0988-2>.
- Bracing, Katherine, și Harvey R. Brown. „Symmetries and Noether's Theorems". În *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, ediție de Katherine A. Brading și Elena Castellani, 89. Cambridge University Press, 2003.
- Brading, K. A., și T. A. Ryckman. „Hilbert's 'Foundations of Physics': Gravitation and electromagnetism within the axiomatic method". *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 39, nr. 1 (1 ianuarie 2008): 102–53.
<https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2007.08.002>.
- Brading, Katherine, Elena Castellani, și Nicholas Teh. „Symmetry and Symmetry Breaking". În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017.
<https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/symmetry-breaking/>.

- Braginsky, V. B., și V. I. Panov. „Verification of the equivalence of inertial and gravitational mass”. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics* 34 (1972): 463–66. <https://istina.msu.ru/publications/article/4687588/>.
- Braginsky, Vladimir B. „Experimental Gravitation (What Is Possible and What Is Interesting to Measure)”. *Classical and Quantum Gravity* 11, nr. 6A (iunie 1994): A1–A7. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/11/6A/001>.
- Brans, C., și R. H. Dicke. „Mach’s Principle and a Relativistic Theory of Gravitation”. *Physical Review* 124, nr. 3 (1 noiembrie 1961): 925–35. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.124.925>.
- Bridle, Sarah L., Ofer Lahav, Jeremiah P. Ostriker, și Paul J. Steinhardt. „Precision Cosmology? Not Just Yet . . .” *Science* 299, nr. 5612 (7 martie 2003): 1532–33. <https://doi.org/10.1126/science.1082158>.
- Brillet, A., și J. L. Hall. „Improved laser test of the isotropy of space”. *Physical Review Letters* 42 (1 februarie 1979): 549–52. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.42.549>.
- Broderick, Avery E., Abraham Loeb, și Ramesh Narayan. „The Event Horizon of Sagittarius A*”. *The Astrophysical Journal* 701, nr. 2 (20 august 2009): 1357–66. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/701/2/1357>.
- Bub, Jeffrey. *Interpreting the Quantum World*. 1st edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- Bucherer, A. H. „Die experimentelle Bestätigung des Relativitätsprinzips”. *Annalen der Physik* 333 (1909): 513–36. <https://doi.org/10.1002/andp.19093330305>.
- Buchert, Thomas. „Dark Energy from Structure: A Status Report”. *General Relativity and Gravitation* 40, nr. 2 (1 februarie 2008): 467–527. <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0554-8>.
- Bunge, Mario. „The Revival of Causality”. În *La Philosophie Contemporaine / Contemporary Philosophy: Chroniques Nouvelles / A New Survey*, ediție de Guttorm Fløistad, 133–55. International Institute of Philosophy / Institut International de Philosophie. Dordrecht: Springer Netherlands, 1982. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9940-0_6.
- Butterfield, J., și C. J. Isham. „On the Emergence of Time in Quantum Gravity”. *arXiv:gr-qc/9901024*, 8 ianuarie 1999. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901024>.
- Butterfield, Jeremy, și Chris Isham. „Spacetime and the Philosophical Challenge of Quantum Gravity”. În *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*. Cambridge University Press, 2001.
- Callender, Craig, și Nick Huggett. *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale: Contemporary Theories in Quantum Gravity*. Cambridge University Press, 2001.
- Cao, Tian Yu. „Prerequisites for a Consistent Framework of Quantum Gravity”. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32, nr. 2 (2001): 181–204.
- Capelli, A. „The Birth of String Theory Edited by Andrea Cappelletti”. Cambridge Core, aprilie 2012. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511977725>.
- Carlip, S. „Black Hole Thermodynamics and Statistical Mechanics”. În *Physics of Black Holes: A Guided Tour*, ediție de Eleftherios Papantonopoulos, 89–123. Lecture Notes in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88460-6_3.
- . „Is Quantum Gravity Necessary?” *Classical and Quantum Gravity* 25, nr. 15 (7 august 2008): 154010. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/25/15/154010>.
- . „Quantum Gravity: a Progress Report”. *Reports on Progress in Physics* 64, nr. 8 (1 august 2001): 885–942. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/64/8/301>.

- Carroll, Sean M. „The Cosmological Constant”. *Living Reviews in Relativity* 4, nr. 1 (7 februarie 2001): 1. <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-1>.
- Cartwright, N., și Roman Frigg. „String Theory Under Scrutiny”, 2008.
- Cartwright, Nancy. *The Dappled World: A Study of the Boundaries of Science*. Cambridge University Press, 1999.
- Cassirer, Ernst. *Zur Einstein'schen relativitätstheorie: Erkenntnistheoretische betrachtungen*. B. Cassirer, 1921.
- Cassirer, Ernst, W. C. Swabey, și M. C. Swabey. *Substance and Function and Einstein's Theory of Relativity*. Courier Corporation, 2003.
- Castro, Alejandra, Alexander Maloney, și Andrew Strominger. „Hidden conformal symmetry of the Kerr black hole”. *Physical Review D* 82, nr. 2 (13 iulie 2010): 024008. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.82.024008>.
- Caves, Carlton Morris. „Theoretical investigations of experimental gravitation”. Phd, California Institute of Technology, 1979. <http://resolver.caltech.edu/CaltechTHESIS:03152016-161054898>.
- Celotti, Annalisa, John C. Miller, și Dennis W. Sciama. „Astrophysical evidence for the existence of black holes”. *Classical and Quantum Gravity* 16, nr. 12A (1 decembrie 1999): A3–21. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/16/12A/301>.
- Cervantes-Cota, Jorge L., Salvador Galindo-Uribarri, și George F. Smoot. „A Brief History of Gravitational Waves”. *Universe* 2, nr. 3 (septembrie 2016): 22. <https://doi.org/10.3390/universe2030022>.
- Challis, James. *Notes on the Principles of Pure and Applied Calculation: And Applications of Mathematical Principles to Theories of the Physical Forces*. University of Michigan Library, 1869.
- Chalmers, Alan F. *What Is This Thing Called Science?* 3 edition. Indianapolis: Hackett Publishing Co., 1999.
- Chandrasekhar, Subrahmanyan. *The Mathematical Theory of Black Holes*. Clarendon Press, 1998.
- Chen, Pisin, și Toshi Tajima. „Testing Unruh Radiation with Ultraintense Lasers”. *Physical Review Letters* 83, nr. 2 (12 iulie 1999): 256–59. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.256>.
- Choi, Charles Q. „Black Hole Pretenders Could Really Be Bizarre Quantum Stars”. *Scientific American*, 2018. <https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-pretenders-could-really-be-bizarre-quantum-stars/>.
- . „Gravitational Waves Detected from Neutron-Star Crashes: The Discovery Explained”. *Space.com*, 2017. <https://www.space.com/38471-gravitational-waves-neutron-star-crashes-discovery-explained.html>.
- Chow, Tai L. *Gravity, Black Holes, and the Very Early Universe: An Introduction to General Relativity and Cosmology*. Springer Science & Business Media, 2007.
- Chown, Marcus. „Gravity May Venture Where Matter Fears to Tread”. *New Scientist*. Data accesării 3 mai 2019. <https://www.newscientist.com/article/mg20126990-400-gravity-may-venture-where-matter-fears-to-tread/>.
- Cicoli, Michele, Francisco G. Pedro, și Gianmassimo Tasinato. „Natural Quintessence in String Theory”. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2012, nr. 07 (23 iulie 2012): 044–044. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2012/07/044>.
- Clarke, C. J. S. „The Analysis of Space-Time Singularities by C. J. S. Clarke”. Cambridge Core, mai 1994. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511608155>.

- Clifton, Timothy, Pedro G. Ferreira, Antonio Padilla, și Constantinos Skordis. „Modified Gravity and Cosmology”. *Physics Reports* 513, nr. 1–3 (martie 2012): 1–189. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001>.
- Close, Frank. *The New Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe*. Revised edition. New York: CRC Press, 2006.
- Cohen, I. Bernard. „Isaac Newton’s Papers & Letters on Natural Philosophy and Related Documents”. *Philosophy of Science* 27, nr. 2 (1960): 209–211.
- Cohen, I. Bernard, și George E. Smith. *The Cambridge Companion to Newton*. Cambridge University Press, 2006.
- Colladay, Don, și Alan Kostelecky. „Lorentz-Violating Extension of the Standard Model”. *Physical Review D* 58, nr. 11 (26 octombrie 1998): 116002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.58.116002>.
- Collett, Thomas E., Lindsay J. Oldham, Russell J. Smith, Matthew W. Auger, Kyle B. Westfall, David Bacon, Robert C. Nichol, Karen L. Masters, Kazuya Koyama, și Remco van den Bosch. „A Precise Extragalactic Test of General Relativity”. *Science* 360, nr. 6395 (22 iunie 2018): 1342–46. <https://doi.org/10.1126/science.aao2469>.
- Collins, Harry M. *Changing Order: Replication and Induction in Scientific Practice*. Reprint edition. Chicago: University of Chicago Press, 1992.
- Cornish, Neil, David Spergel, și Glenn Starkman. „Circles in the Sky: Finding Topology with the Microwave Background Radiation”. *Classical and Quantum Gravity* 15, nr. 9 (1 septembrie 1998): 2657–70. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/15/9/013>.
- Cowen, Ron. „The Quantum Source of Space-Time”. *Nature News* 527, nr. 7578 (19 noiembrie 2015): 290. <https://doi.org/10.1038/527290a>.
- Crupi, Vincenzo. „Confirmation”, 30 mai 2013. <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/confirmation/>.
- Curiel, Erik. „Against the Excesses of Quantum Gravity: A Plea for Modesty”. *Proceedings of the Philosophy of Science Association* 2001, nr. 3 (2001): S424–.
- . „Singularities and Black Holes”. În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Spring 2019. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2019. <https://plato.stanford.edu/archives/spr2019/entries/spacetime-singularities/>.
- . „The Analysis of Singular Spacetimes”. *Philosophy of Science* 66, nr. 3 (1999): 145.
- Cutler, Curt, și Kip S. Thorne. „An Overview of Gravitational-Wave Sources”. *arXiv:gr-qc/0204090*, 30 aprilie 2002. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0204090>.
- Dalal, Neal, Daniel E. Holz, Scott A. Hughes, și Bhuvnesh Jain. „Short GRB and binary black hole standard sirens as a probe of dark energy”. *Physical Review D* 74, nr. 6 (18 septembrie 2006): 063006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.74.063006>.
- Damour, T. „The problem of motion in Newtonian and Einsteinian gravity.” În *Three Hundred Years of Gravitation*, 128–98, 1987. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1987thyg.book..128D>.
- Davies, P. C. W. „Thermodynamics of Black Holes”. *Reports on Progress in Physics* 41, nr. 8 (august 1978): 1313–1355. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/41/8/004>.
- Dawid, Richard. „On the Conflicting Assessments of the Current Status of String Theory”. Preprint, aprilie 2008. <http://philsci-archive.pitt.edu/4009/>.

- . „Scientific Realism in the Age of String Theory”. *Physics and Philosophy*, 2007.
- . *String Theory and the Scientific Method*. 1 edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- Dawid, Richard, Stephan Hartmann, și Jan Sprenger. „The No Alternatives Argument”. Preprint, 24 februarie 2013. <http://philsci-archive.pitt.edu/9588/>.
- De Lorenci, V. A., M. Faundez-Abans, și J. P. Pereira. „Testing the Newton second law in the regime of small accelerations”. *Astronomy & Astrophysics* 503, nr. 1 (august 2009): L1–4. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200811520>.
- Deser, S. „Self-Interaction and Gauge Invariance”. *General Relativity and Gravitation* 1, nr. 1 (1 martie 1970): 9–18. <https://doi.org/10.1007/BF00759198>.
- DeWitt, B. S., și Louis Witten. *The Quantization of Geometry, in Gravitation an Introduction to Current Research*. First Edition edition. John Wiley & Sons, 1962.
- DeWitt, Bryce S. „Definition of Commutators via the Uncertainty Principle”. *Journal of Mathematical Physics* 3 (1 iulie 1962): 619–24. <https://doi.org/10.1063/1.1724265>.
- . „Quantum Theory of Gravity. I. The Canonical Theory”. *Physical Review* 160, nr. 5 (25 august 1967): 1113–48. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.160.1113>.
- DeWitt, C. *Experimental relativity, in Relativity Groups and Topology. Lectures Delivered at Les Houches During the 1963 Session of the Summer School of Theoretical Physics*. Second Printing edition. Gordon & Breach, 1965.
- Dicke, R. H. *Gravitation and the universe.*, 1969. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1969grun.book.....D>.
- Dirac, Paul A. M. *Lectures on Quantum Mechanics*. Mineola, NY: Snowball Publishing, 2012.
- Disalle, Robert. „Spacetime Theory as Physical Geometry”. *Erkenntnis* 42, nr. 3 (1995): 317–337.
- Dittrich, B. „Partial and Complete Observables for Hamiltonian Constrained Systems”. *General Relativity and Gravitation* 39, nr. 11 (1 noiembrie 2007): 1891–1927. <https://doi.org/10.1007/s10714-007-0495-2>.
- Dowker, Fay, Jerome P. Gauntlett, David A. Kastor, și Jennie Traschen. „Pair Creation of Dilaton Black Holes”. *Physical Review D* 49, nr. 6 (15 martie 1994): 2909–17. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.49.2909>.
- Drake, Stillman. *Galileo at Work: His Scientific Biography*. Courier Corporation, 2003.
- Duff, Michael J. „The Theory Formerly Known as Strings”. *Scientific American* 278 (1 februarie 1998): 64–69. <https://doi.org/10.1038/scientificamericano298-64>.
- Duhem, P. „La Théorie Physique, Son Objet Et Sa Structure”. *Revue Philosophique de la France Et de l'Etranger* 61 (1906): 324–327.
- Duhem, Pierre Maurice Marie, Jules Vuillemin, și Louis de Broglie. *The Aim and Structure of Physical Theory*. Traducere de Philip P. Wiener. 9932nd edition. Princeton: Princeton University Press, 1991.
- Dyson, Freeman. „The World on a String”, 13 mai 2004. <https://www.nybooks.com/articles/2004/05/13/the-world-on-a-string/>.
- Earman, John. „Bangs, Crunches, Whimpers and Shrieks: Singularities and Acausalities in Relativistic Spacetimes”. *British Journal for the Philosophy of Science* 49, nr. 2 (1998): 338–347.

- . „Thoroughly Modern McTaggart: Or, What McTaggart Would Have Said If He Had Read the General Theory of Relativity”. *Philosophers' Imprint* 2 (2002): 1–28.
- Easther, Richard, Brian R. Greene, William H. Kinney, și Gary Shiu. „Inflation as a Probe of Short Distance Physics”. *Physical Review D* 64, nr. 10 (16 octombrie 2001): 103502. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.103502>.
- Edwards, Matthew R., ed. *Pushing Gravity: New Perspectives on Le Sage's Theory of Gravitation*. Y First edition edition. Montreal: Apeiron, 2002.
- Ehlers, J., P. Geren, și R. K. Sachs. „Isotropic Solutions of the Einstein-Liouville Equations”. *Journal of Mathematical Physics* 9, nr. 9 (1 septembrie 1968): 1344–49. <https://doi.org/10.1063/1.1664720>.
- Einstein, A. „The foundation of the general theory of relativity”. În *The Principle of Relativity*. Dover Books on Physics. June 1, 1952. 240 pages. 0486600815, p. 109–164, 109–64, 1952. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1952prel.book..109E>.
- Einstein, A., B. Podolsky, și N. Rosen. „Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?” *Physical Review* 47, nr. 10 (15 mai 1935): 777–80. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.47.777>.
- Einstein, A., și N. Rosen. „On Gravitational Waves”. *Journal of The Franklin Institute* 223 (1 ianuarie 1937): 43–54. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(37\)90583-0](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(37)90583-0).
- Einstein, Albert. „Autobiographische Skizze”. În *Helle Zeit — Dunkle Zeit: In memoriam Albert Einstein*, ediție de Carl Seelig, 9–17. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1956. https://doi.org/10.1007/978-3-322-84225-1_2.
- . *Fundamental Ideas and Problems of the Theory of Relativity: Lecture Delivered to the Nordic Assembly of Naturalists at Göteborg on July 11, 1923*. Nobel Museum, 2009.
- . *Geometrie und Erfahrung: Erweiterte Fassung des Festvortrages Gehalten an der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin am 27. Januar 1921*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1921. <https://www.springer.com/de/book/9783642499036>.
- . „Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation”. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, Seite 688–696., 1916. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1916SPAW.....688E>.
- . *Teoria relativității: Relativitatea specială și relativitatea generală*. Nicolae Sfetcu, 2017. <https://books.google.ro/books?id=aMtNDwAAQBAJ>.
- . „The Meaning of Relativity”. Princeton University Press, 1921. <https://press.princeton.edu/titles/484.html>.
- . *The Principle of Relativity*. S.l.: BN Publishing, 2008.
- . „Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogene Folgerungen, in Volume 2: The Swiss Years: Writings, 1900–1909 Page 432 (468 of 692)”, 1907. <https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol2-doc/468>.
- . *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*. 23. Aufl. 2001. Nachdruck. Berlin: Springer, 2002.
- Einstein, Albert (Author). „Motive des Forschens.”, 1918. <http://alberteinstein.info/vufind1/Record/EAR000079148>.
- Ellis, G. F. R., și J. E. Baldwin. „On the Expected Anisotropy of Radio Source Counts”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 206, nr. 2 (1 ianuarie 1984): 377–81. <https://doi.org/10.1093/mnras/206.2.377>.

- Ellis, G. F. R., S. D. Nel, R. Maartens, W. R. Stoeger, și A. P. Whitman. „Ideal observational cosmology”. *Physics Reports* 124, nr. 5 (1 iulie 1985): 315–417. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(85\)90030-4](https://doi.org/10.1016/0370-1573(85)90030-4).
- Ellis, George F R. „Issues in the philosophy of cosmology”. În *Philosophy of Physics*, ediție de Jeremy Butterfield și John Earman, 1183–1285. Handbook of the Philosophy of Science. Amsterdam: North-Holland, 2007. <https://doi.org/10.1016/B978-044451560-5/50014-2>.
- Enger, Hakon. „String Theory and the Scientific Method”, 2003. <http://home.simula.no/~henger/publ/mnvit-essay.pdf>.
- Eötvös, Roland V., Desiderius Pekár, și Eugen Fekete. „Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität”. *Annalen der Physik* 373 (1922): 11–66. <https://doi.org/10.1002/andp.19223730903>.
- Esfeld, Michael, și Vincent Lam. „Moderate Structural Realism About Space-Time”. *Synthese* 160, nr. 1 (2008): 27–46.
- Euler, Leonhard. *Briefe an eine deutsche Prinzessin, aus dem Französischen übersetzt*. Junius, 1773. <https://books.google.ro/books?id=FaMAAAAAMAAJ>.
- . *Sol et Luna I: Opera Mechanica Et Astronomica Vol 23*. Ediție de Otto Fleckenstein. 1956 edition. Basileae: Birkhäuser, 1956.
- Everitt, C. W. F., D. B. DeBra, B. W. Parkinson, J. P. Turneare, J. W. Conklin, M. I. Heifetz, G. M. Keiser, et al. „Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity”. *Physical Review Letters* 106, nr. 22 (31 mai 2011): 221101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.221101>.
- Famaey, Benoit, și Stacy McGaugh. „Modified Newtonian Dynamics (MOND): Observational Phenomenology and Relativistic Extensions”. *Living Reviews in Relativity* 15, nr. 1 (decembrie 2012): 10. <https://doi.org/10.12942/lrr-2012-10>.
- Faraoni, Valerio. „Illusions of general relativity in Brans-Dicke gravity”. *Physical Review D* 59, nr. 8 (22 martie 1999): 084021. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.59.084021>.
- Farley, F. J. M., J. Bailey, R. C. A. Brown, M. Giesch, H. Jöstlein, S. van der Meer, E. Picasso, și M. Tannenbaum. „The Anomalous Magnetic Moment of the Negative Muon”. *Il Nuovo Cimento A (1965-1970)* 45, nr. 1 (1 septembrie 1966): 281–86. <https://doi.org/10.1007/BF02738104>.
- Feldman, Richard. „Naturalized Epistemology”, 5 iulie 2001. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2012/entries/epistemology-naturalized/>.
- Ferrarese, Laura, și David Merritt. „A Fundamental Relation Between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies”. *The Astrophysical Journal* 539, nr. 1 (10 august 2000): L9–12. <https://doi.org/10.1086/312838>.
- Feyerabend, Paul. *Against Method*. London: New Left Books, 1975.
- Feynman, Richard P. „The Feynman Lectures on Physics”, 2013. <http://www.feynmanlectures.caltech.edu/>.
- Feynman, Richard P, Fernando B Morinigo, William G Wagner, și Brian Hatfield. *Feynman Lectures on Gravitation*. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995.
- Fine, Arthur. *The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory*. University of Chicago Press, 1986.
- Fischbach, E., D. Sudarsky, A. Szafer, C. Talmadge, și S. H. Aronson. „Reanalysis of the Eotvos experiment”. *Physical Review Letters* 56 (1 ianuarie 1986): 3–6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.56.3>.
- Fischer, M., N. Kolachevsky, M. Zimmermann, R. Holzwarth, Th Udem, T. W. Haensch, M. Abgrall, et al. „New Limits to the Drift of Fundamental Constants

- from Laboratory Measurements". *Physical Review Letters* 92, nr. 23 (10 iunie 2004): 230802. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.230802>.
- Fleischhack, Christian. „Irreducibility of the Weyl Algebra in Loop Quantum Gravity". *Physical Review Letters* 97, nr. 6 (11 august 2006): 061302. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.97.061302>.
- Fomalont, E. B., și S. M. Kopeikin. „The Measurement of the Light Deflection from Jupiter: Experimental Results". *The Astrophysical Journal* 598, nr. 1 (20 noiembrie 2003): 704–11. <https://doi.org/10.1086/378785>.
- Fomalont, E., S. Kopeikin, G. Lanyi, și J. Benson. „Progress in Measurements of the Gravitational Bending of Radio Waves Using the VLBA". *The Astrophysical Journal* 699, nr. 2 (10 iulie 2009): 1395–1402. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/699/2/1395>.
- Fomalont, Ed, Sergei Kopeikin, Dayton Jones, Mareki Honma, și Oleg Titov. „Recent VLBA/VERA/IVS Tests of General Relativity". *Proceedings of the International Astronomical Union* 5, nr. S261 (aprilie 2009): 291–95. <https://doi.org/10.1017/S1743921309990536>.
- Font, José A. „Numerical Hydrodynamics in General Relativity". *Living Reviews in Relativity* 6, nr. 1 (19 august 2003): 4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-4>.
- Franklin, Allan. „Calibration". În *Can That Be Right? Essays on Experiment, Evidence, and Science*, ediție de Allan Franklin, 237–72. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5334-8_9.
- . *Shifting Standards: Experiments in Particle Physics in the Twentieth Century*. 1 edition. Pittsburgh, Pa: University of Pittsburgh Press, 2013.
- Franklin, Allan, și Slobodan Perovic. „Experiment in Physics". În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Winter 2016. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2016. <https://plato.stanford.edu/archives/win2016/entries/physics-experiment/>.
- Fresnel, A. „Lettre a Francois Arago sur L'Influence du Mouvement Terrestre dans quelques Phenomenes Optiques, in Annales de chimie et de physique - 98 Years available - Gallica", 1818. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343780820/date.r=Annales+de+chimie+et+de+physique.langEN>.
- Friedman, A. „On the Curvature of Space". *General Relativity and Gravitation* 31, nr. 12 (1 decembrie 1999): 1991–2000. <https://doi.org/10.1023/A:1026751225741>.
- Friedman, Michael. *Foundations of Space-Time Theories: Relativistic Physics and Philosophy of Science*. Princeton University Press, 1983.
- . „Geometry, Convention, and the Relativized A Priori: Reichenbach, Schlick, and Carnap". *Reconsidering Logical Positivism*, iulie 1999. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139173193.006>.
- Friedrich, H. „Is General Relativity ‘Essentially Understood’?" *Annalen Der Physik* 15, nr. 1–2 (2006): 84–108. <https://doi.org/10.1002/andp.200510173>.
- Fumagalli, Michele, John M. O'Meara, și J. Xavier Prochaska. „Detection of Pristine Gas Two Billion Years After the Big Bang". *Science* 334, nr. 6060 (2 decembrie 2011): 1245–49. <https://doi.org/10.1126/science.1213581>.
- Galison, Peter. „How Experiments End". *Journal of Philosophy* 87, nr. 2 (1990): 103–106.
- . *Laws of Nature: Essays on the Philosophic, Scientific, and Historical Dimensions*. Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1995.

- Gambini, Rodolfo, și Jorge Pullin. „Quantum Gravity Experimental Physics?” *General Relativity and Gravitation* 31, nr. 11 (1 noiembrie 1999): 1631–37. <https://doi.org/10.1023/A:1026701930767>.
- Garay, L. J., J. R. Anglin, J. I. Cirac, și P. Zoller. „Sonic analog of gravitational black holes in Bose-Einstein condensates”. *Physical Review Letters* 85, nr. 22 (27 noiembrie 2000): 4643–47. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.4643>.
- Georgi, H., și Paul Davies. *Grand Unified Theories, in The New Physics*. Cambridge University Press, 1992.
- Geroch, Robert, Liang Can-bin, și Robert M. Wald. „Singular boundaries of space-times”. *Journal of Mathematical Physics* 23, nr. 3 (1 martie 1982): 432–35. <https://doi.org/10.1063/1.525365>.
- Ghirardi, G. C., A. Rimini, și T. Weber. „Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems”. *Physical Review D* 34, nr. 2 (15 iulie 1986): 470–91. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470>.
- Gholson, Barry, și Peter Barker. „Kuhn, Lakatos, and Laudan: Applications in the history of physics and psychology”. *American Psychologist* 40, nr. 7 (1985): 755–69. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.40.7.755>.
- Giddings, Steven B. „The black hole information paradox”. *arXiv:hep-th/9508151*, 28 august 1995. <http://arxiv.org/abs/hep-th/9508151>.
- Gillessen, S., F. Eisenhauer, S. Trippe, T. Alexander, R. Genzel, F. Martins, și T. Ott. „Monitoring stellar orbits around the Massive Black Hole in the Galactic Center”. *The Astrophysical Journal* 692, nr. 2 (20 februarie 2009): 1075–1109. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/692/2/1075>.
- Giovanelli, Marco. „The Forgotten Tradition: How the Logical Empiricists Missed the Philosophical Significance of the Work of Riemann, Christoffel and Ricci”. *Erkenntnis* 78, nr. 6 (1 decembrie 2013): 1219–57. <https://doi.org/10.1007/s10670-012-9407-2>.
- Gladders, Michael D., H. K. C. Yee, Subhabrata Majumdar, L. Felipe Barrientos, Henk Hoekstra, Patrick B. Hall, și Leopoldo Infante. „Cosmological Constraints from the Red-Sequence Cluster Survey”. *The Astrophysical Journal* 655, nr. 1 (ianuarie 2007): 128–134. <https://doi.org/10.1086/509909>.
- Gleiser, Reinaldo J., și Carlos N. Kozameh. „Astrophysical limits on quantum gravity motivated birefringence”. *Physical Review D* 64, nr. 8 (septembrie 2001): 083007. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.64.083007>.
- Goldstein, Sheldon, și Stefan Teufel. „Quantum spacetime without observers: ontological clarity and the conceptual foundations of quantum gravity”. *arXiv:quant-ph/9902018*, 5 februarie 1999. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9902018>.
- Goodman, Jeremy. „Geocentrism reexamined”. *Physical Review D* 52, nr. 4 (15 august 1995): 1821–27. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.1821>.
- Graña, Mariana. „The Low Energy Limit of String Theory and Its Compactifications with Background Fluxes”. *Letters in Mathematical Physics* 78, nr. 3 (1 decembrie 2006): 279–305. <https://doi.org/10.1007/s11005-006-0125-z>.
- Grant, Edward. *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages: Their Religious, Institutional and Intellectual Contexts*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1996.
- Green, M. B., J. H. Schwarz, și E. Witten. „Superstring Theory. Vol. 1: Introduction”. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik* 68, nr. 6 (1988): 258–258. <https://doi.org/10.1002/zamm.19880680630>.

- Greene, Brian. *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. 2nd ed. edition. New York London: W. W. Norton & Company, 2010.
- Grujić, Petar V. „Some epistemic questions of cosmology”. *arXiv:0709.3191 [physics]*, 20 septembrie 2007. <http://arxiv.org/abs/0709.3191>.
- Grünbaum, Adolf. *Philosophical Problems of Space and Time: Second, Enlarged Edition*. Springer Science & Business Media, 2012.
- Hacking, Ian. „Do We See Through a Microscope?” *Pacific Philosophical Quarterly* 62, nr. 4 (1981): 305–322.
- . „Representing and Intervening by Ian Hacking”. Cambridge Core, octombrie 1983. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511814563>.
- . *The Social Construction of What?* Revised edition. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 2000.
- Hagar, Amit, și Meir Hemmo. „The Primacy of Geometry”. ResearchGate, 2013. https://www.researchgate.net/publication/259158226_The_primacy_of_geometry.
- Hall, L. J., și U. Sarid. „Gravitational Smearing of Minimal Supersymmetric Unification Predictions”. *Physical Review Letters* 70, nr. 18 (3 mai 1993): 2673–76. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.70.2673>.
- Hambaryan, V., V. Suleimanov, F. Haberl, A. D. Schwope, R. Neuhaeuser, M. Hohle, și K. Werner. „On the compactness of the isolated neutron star RX J0720.4-3125”. *Astronomy & Astrophysics* 601 (mai 2017): A108. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201630368>.
- Hamber, Herbert W. *Quantum Gravitation: The Feynman Path Integral Approach*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. <https://www.springer.com/gp/book/9783540852926>.
- Hansson, Johan. „Aspects of nonrelativistic quantum gravity”. *arXiv:0910.4289 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:hep-ph, physics:quant-ph]*, 22 octombrie 2009. <http://arxiv.org/abs/0910.4289>.
- Hansson, Johan, și Stephane Francois. „Testing Quantum Gravity”. *International Journal of Modern Physics D* 26, nr. 12 (octombrie 2017): 1743003. <https://doi.org/10.1142/S0218271817430039>.
- Harman, P. M., și Peter Michael Harman. *The Natural Philosophy of James Clerk Maxwell*. Cambridge University Press, 2001.
- Haro, Sebastian de, Dennis Dieks, Gerard 't Hooft, și Erik Verlinde. „Forty Years of String Theory Reflecting on the Foundations”. *Foundations of Physics* 43, nr. 1 (1 ianuarie 2013): 1–7. <https://doi.org/10.1007/s10701-012-9691-3>.
- Hassan, S. F., și Rachel A. Rosen. „Bimetric Gravity from Ghost-Free Massive Gravity”. *Journal of High Energy Physics* 2012, nr. 2 (24 februarie 2012): 126. [https://doi.org/10.1007/JHEP02\(2012\)126](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2012)126).
- Hawking, S. W. „Gravitational Radiation from Colliding Black Holes”. *Physical Review Letters* 26, nr. 21 (24 mai 1971): 1344–46. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1344>.
- . „Particle Creation by Black Holes”. *Communications in Mathematical Physics* 43, nr. 3 (1 august 1975): 199–220. <https://doi.org/10.1007/BF02345020>.
- Hawking, S. W., și W. Israel. *Quantum Cosmology, in Three Hundred Years of Gravitation*. Cambridge University Press, 1989.
- Hawking, Stephen. „Gödel and the End of Physics”, 2003. <https://www.caltech.edu/campus-life-events/master-calendar/stephen-hawking-goumldel-and-the-end-of-physics>.

- Hawking, Stephen W., G. F. R. Ellis, P. V. Landshoff, D. R. Nelson, D. W. Sciama, și S. Weinberg. *The Large Scale Structure of Space-Time*. New Ed edition. Cambridge: Cambridge University Press, 1975.
- Heckman, Jonathan J., și Cumrun Vafa. „Flavor Hierarchy From F-theory”. *Nuclear Physics B* 837, nr. 1–2 (septembrie 2010): 137–51. <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2010.05.009>.
- Hedrich, Reiner. „The Internal and External Problems of String Theory: A Philosophical View”. *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 38, nr. 2 (2006): 261–278.
- Hehl, Friedrich W., Paul von der Heyde, G. David Kerlick, și James M. Nester. „General relativity with spin and torsion: Foundations and prospects”. *Reviews of Modern Physics* 48, nr. 3 (1 iulie 1976): 393–416. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.48.393>.
- Herapath, J. „On the Causes, Laws and Phenomena of Heat, Gases, Gravitation I, II, III, in *Annals of Philosophy, or Magazine of Chemistry, Mineralogy, Mechanics, Natural History, Agriculture and the Arts* 1 Pp. 273–293”, Atticus Rare Books, 1821. <https://www.atticusrarebooks.com/pages/books/761/john-herapath/on-the-causes-laws-and-phenomena-of-heat-gases-gravitation-i-ii-iii-in-annals-of-philosophy-or>.
- Hetherington, N. S. „Sirius B and the Gravitational Redshift: An Historical Review”. ResearchGate, 1980. https://www.researchgate.net/publication/234478409_Sirius_B_and_the_gravitational_redshift_An_historical_review.
- Heusler, Markus, Piotr T. Chruściel, și João Lopes Costa. „Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond”. *Living Reviews in Relativity* 15, nr. 1 (decembrie 2012): 7. <https://doi.org/10.12942/lrr-2012-7>.
- Hill, G. W. „The Collected Mathematical Works of G. W. Hill”. *Nature* 75, nr. 1936 (decembrie 1906): 123. <https://doi.org/10.1038/075123a0>.
- Holt, Niles. „Wilhelm Ostwald’s ‘The Bridge’”. *British Journal for the History of Science* 10, nr. 2 (1977): 146–150.
- Holton, Gerald. „Einstein, Michelson, and the «Crucial» Experiment”. *Isis: A Journal of the History of Science* 60 (1969): 132–197.
- Hooft, G. ’t. „Dimensional Reduction in Quantum Gravity”. *arXiv:gr-qc/9310026*, 19 octombrie 1993. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9310026>.
- Hooft, G. ’t, și M. Veltman. „One-loop divergencies in the theory of gravitation”. *Annales de L’Institut Henri Poincaré Section (A) Physique Théorique* 20 (1974): 69–94. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1974AIHPA..20...69T>.
- Horvath, J. E., E. A. Logiudice, C. Riveros, și H. Vucetich. „Einstein equivalence principle and theories of gravitation: A gravitationally modified standard model”. *Physical Review D* 38, nr. 6 (15 septembrie 1988): 1754–60. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.38.1754>.
- Hossenfelder, Sabine. „Experimental Search for Quantum Gravity”. *arXiv:1010.3420 [gr-qc, physics:hep-ph, physics:hep-th]*, 17 octombrie 2010. <http://arxiv.org/abs/1010.3420>.
- Hossenfelder, Sabine, și Tobias Mistele. „The Redshift-Dependence of Radial Acceleration: Modified Gravity versus Particle Dark Matter”. *International Journal of Modern Physics D* 27, nr. 14 (octombrie 2018): 1847010. <https://doi.org/10.1142/S0218271818470107>.
- Hossenfelder, Sabine, și Lee Smolin. „Phenomenological Quantum Gravity”. *arXiv:0911.2761 [gr-qc, physics:physics]*, 14 noiembrie 2009. <http://arxiv.org/abs/0911.2761>.

- Howard, Don A. „Einstein's Philosophy of Science”. În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Fall 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017.
<https://plato.stanford.edu/archives/fall2017/entries/einstein-philsience/>.
- Huggett, Nick, Tiziana Vistarini, și Christian Wuthrich. „Time in quantum gravity”. *arXiv:1207.1635 [gr-qc, physics:physics]*, 3 iulie 2012.
<http://arxiv.org/abs/1207.1635>.
- Hulse, R. A., și J. H. Taylor. „Discovery of a pulsar in a binary system”. *The Astrophysical Journal Letters* 195 (1 ianuarie 1975): L51–53.
<https://doi.org/10.1086/181708>.
- Huygens, Christiaan. *Discours de La Cause de La Pesanteur*, 1885.
- Ibanez, L. E. „The second string (phenomenology) revolution”. *Classical and Quantum Gravity* 17, nr. 5 (7 martie 2000): 1117–28.
<https://doi.org/10.1088/0264-9381/17/5/321>.
- Iorio, Lorenzo. „An Assessment of the Systematic Uncertainty in Present and Future Tests of the Lense-Thirring Effect with Satellite Laser Ranging”. *Space Science Reviews* 148, nr. 1–4 (decembrie 2009): 363–81.
<https://doi.org/10.1007/s11214-008-9478-1>.
- . „On the Lense-Thirring test with the Mars Global Surveyor in the gravitational field of Mars”. *Open Physics* 8, nr. 3 (1 ianuarie 2010).
<https://doi.org/10.2478/s11534-009-0117-6>.
- Ivanchik, A. V., A. Y. Potekhin, și D. A. Varshalovich. „The fine-structure constant: a new observational limit on its cosmological variation and some theoretical consequences”. *arXiv:astro-ph/9810166*, 10 octombrie 1998.
<http://arxiv.org/abs/astro-ph/9810166>.
- Jain, Bhuvnesh, Vinu Vikram, și Jeremy Sakstein. „Astrophysical Tests of Modified Gravity: Constraints from Distance Indicators in the Nearby Universe”. *The Astrophysical Journal* 779, nr. 1 (25 noiembrie 2013): 39.
<https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/39>.
- Jaki, Stanley L. *The Relevance of Physics*. First Edition edition. Chicago: University Of Chicago Press, 1966.
- Janiak, Andrew. *Newton as Philosopher*. Cambridge University Press, 2010.
- Jaranowski, Piotr, și Andrzej Królak. „Gravitational-Wave Data Analysis. Formalism and Sample Applications: The Gaussian Case”. *Living Reviews in Relativity* 8, nr. 1 (21 martie 2005): 3. <https://doi.org/10.12942/lrr-2005-3>.
- Joshi, Pankaj S. „Cosmic Censorship: A Current Perspective”. *arXiv:gr-qc/0206087*, 28 iunie 2002. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0206087>.
- Kallosh, Renata, Andrei Linde, Dmitri Linde, și Leonard Susskind. „Gravity and global symmetries”. *Physical Review D* 52, nr. 2 (15 iulie 1995): 912–35.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.912>.
- Kaluza, Theodor. „Zum Unitätsproblem in der Physik | BibSonomy”, 1921.
<https://www.bibsonomy.org/bibtex/19218e3a965ffaefa3af2d4c14bb5ae52/zhaozhho2>.
- Kaufmann, W. „Über die Konstitution des Elektrons”. *Annalen der Physik* 324 (1906): 487–553. <https://doi.org/10.1002/andp.19063240303>.
- Kennefick, Daniel, și Jürgen Renn. *Astronomers Test General Relativity: Light-bending and the Solar Redshift, in Albert Einstein - Chief Engineer of the Universe: 100 Authors for Einstein Essays*, 2005.
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2005alei.book....R>.

- Kiefer, C. „Quantum gravity: general introduction and recent developments”. *Annalen der Physik* 518 (1 ianuarie 2006): 129–48.
<https://doi.org/10.1002/andp.200510175>.
- . „Time in Quantum Gravity”. În *The Oxford Handbook of Philosophy of Time*, ediție de Craig Callender, 667. Oxford University Press, 2011.
- Kiefer, Claus. „Quantum Gravity — A Short Overview”. În *Quantum Gravity: Mathematical Models and Experimental Bounds*, ediție de Bertfried Fauser, Jürgen Tolksdorf, și Eberhard Zeidler, 1–13. Basel: Birkhäuser Basel, 2007.
https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7978-0_1.
- Klebanov, Igor R., și Juan M. Maldacena. „Solving quantum field theories via curved spacetimes”. *Physics Today* 62, nr. 1 (1 ianuarie 2009): 28–33.
<https://doi.org/10.1063/1.3074260>.
- Kopeikin, Sergei M. „Testing the Relativistic Effect of the Propagation of Gravity by Very Long Baseline Interferometry”. *The Astrophysical Journal* 556, nr. 1 (2001): L1–5.
https://www.academia.edu/18481905/TESTING_THE_RELATIVISTIC_EFFECT_OF_THE_PROPAGATION_OF_GRAVITY_BY_VERY_LONG_BASELINE_INTERFEROMETRY.
- Kopeikin, Sergei M., și Edward B. Fomalont. „Gravimagnetism, Causality, and Aberration of Gravity in the Gravitational Light-Ray Deflection Experiments”. *General Relativity and Gravitation* 39, nr. 10 (1 octombrie 2007): 1583–1624.
<https://doi.org/10.1007/s10714-007-0483-6>.
- Kosteletsky, Alan, și Rob Potting. „Expectation Values, Lorentz Invariance, and CPT in the Open Bosonic String”. *Physics Letters B* 381, nr. 1–3 (iulie 1996): 89–96.
[https://doi.org/10.1016/0370-2693\(96\)00589-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00589-8).
- Koyre, Alexandre. *From the Closed World to the Infinite Universe*. Johns Hopkins University Press, 1957.
- Kragh, Helge. *Dirac: A Scientific Biography*. 1 edition. Cambridge England ; New York: Cambridge University Press, 1990.
- . „Fundamental Theories and Epistemic Shifts: Can History of Science Serve as a Guide?” *arXiv:1702.05648 [physics]*, 18 februarie 2017.
<http://arxiv.org/abs/1702.05648>.
- Kramer, Michael. „Millisecond Pulsars as Tools of Fundamental Physics”. În *Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants*, ediție de Savely G. Karshenboim și Ekkehard Peik, 33–54. Lecture Notes in Physics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2004. https://doi.org/10.1007/978-3-540-40991-5_3.
- Krisher, null, null Maleki, null Lutes, null Primas, null Logan, null Anderson, și null Will. „Test of the Isotropy of the One-Way Speed of Light Using Hydrogen-Maser Frequency Standards”. *Physical Review. D, Particles and Fields* 42, nr. 2 (15 iulie 1990): 731–34.
- Kristian, J., și R. K. Sachs. „Observations in Cosmology”. *The Astrophysical Journal* 143 (1 februarie 1966): 379. <https://doi.org/10.1086/148522>.
- Krolik, Julian Henry. *Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment*. Princeton University Press, 1999.
- Kroupa, Pavel. *The vast polar structures around the Milky Way and Andromeda*, 2013. <https://www.youtube.com/watch?v=UPVGDXNSBZM>.
- Kuchař, Karel. „Canonical Quantization of Gravity”. *Relativity, Astrophysics and Cosmology*, 1973, 237–88. https://doi.org/10.1007/978-94-010-2639-0_5.
- Kuchar, Karel. „Canonical Quantum Gravity”. *arXiv:gr-qc/9304012*, 8 aprilie 1993.
<http://arxiv.org/abs/gr-qc/9304012>.

- Kuhn, Thomas S. *The Structure of Scientific Revolutions*. 3rd edition. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1996.
- Kuhn, Thomas S., și Jim Conant. *The Road Since Structure: Philosophical Essays, 1970-1993, with an Autobiographical Interview*. University of Chicago Press, 2000.
- Kustaanheimo, Paul Edwin, și V. S. Nuotio. *Relativistic Theories of Gravitation*. Helsingin Yliopisto. Department of Applied Mathematics, 1967.
- Lakatos, Imre. „Criticism and the Methodology of Scientific Research Programmes”. *Proceedings of the Aristotelian Society* 69, nr. 1 (1968): 149–186.
- . *The Methodology of Scientific Research Programmes: Volume 1: Philosophical Papers*. Cambridge University Press, 1980.
- Lam, Vincent. „Quantum Structure and Spacetime.” *Metaphysics in Contemporary Physics*, 1 ianuarie 2016, 81–99.
https://doi.org/10.1163/9789004310827_005.
- Lam, Vincent, și Michael Esfeld. „The Structural Metaphysics of Quantum Theory and General Relativity”. *Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für Allgemeine Wissenschaftstheorie* 43, nr. 2 (2012): 243–258.
- Landau, L. D., și E. M. Lifshitz. *Fluid Mechanics: Volume 6*. 2 edition. Amsterdam u.a: Butterworth-Heinemann, 1987.
- Laplace, Pierre-Simon Marquis De. *Exposition du système du monde*. 2-lea ed. Cambridge; 2009: Cambridge University Press, 2009.
- Larmor, Joseph. *On the ascertained Absence of Effects of Motion through the Aether, in relation to the Constitution of Matter, and on the FitzGerald-Lorentz Hypothesis*, 1904.
- Latour, Bruno, Steve Woolgar, și Jonas Salk. *Laboratory Life: The Construction of Scientific Facts, 2nd Edition*. 2nd edition. Princeton, N.J: Princeton University Press, 1986.
- Laudan, L. *Progress and its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth*. University of California Press, 1977.
- Laudan, Larry. „Progress or Rationality? The Prospects for Normative Naturalism”. *American Philosophical Quarterly* 24, nr. 1 (1987): 19–31.
- Le Verrier, U. *Lettre de M. Le Verrier à M. Faye sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète*, in *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*. Paris : Gauthier-Villars, 1859.
<http://archive.org/details/comptesrendusheb49acad>.
- Lehmkuhl, D., D. Dieks, și M. Redei. „Is spacetime a gravitational field?”, in *The Ontology of Spacetime II, Volume 4 - 1st Edition*, 2008.
<https://www.elsevier.com/books/the-ontology-of-spacetime-ii/dieks/978-0-444-53275-6>.
- Lemaître, Abbé G. „A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulae”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 91, nr. 5 (13 martie 1931): 483–90.
<https://doi.org/10.1093/mnras/91.5.483>.
- Lense, Josef, și Hans Thirring. „Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie”. *Physikalische Zeitschrift* 19 (1918).
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1918PhyZ...19..156L>.
- Leonhardt, U., și P. Piwnicki. „Relativistic Effects of Light in Moving Media with Extremely Low Group Velocity”. *Physical Review Letters* 84, nr. 5 (31 ianuarie 2000): 822–25. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.84.822>.

- Lewandowski, Jerzy, Andrzej Okołów, Hanno Sahlmann, și Thomas Thiemann. „Uniqueness of Diffeomorphism Invariant States on Holonomy–Flux Algebras”. *Communications in Mathematical Physics* 267, nr. 3 (1 noiembrie 2006): 703–33. <https://doi.org/10.1007/s00220-006-0100-7>.
- Lightman, A. P., și D. L. Lee. „Restricted Proof That the Weak Equivalence Principle Implies the Einstein Equivalence Principle”. *Physical Review. D, Particles Fields* 8, nr. 2 (1973): 364–76. http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:5098997.
- LIGO Scientific Collaboration. „Detection of gravitational waves”, 2019. <https://www.ligo.org/detections.php>.
- Lineweaver, C. H., L. Tenorio, G. F. Smoot, P. Keegstra, A. J. Banday, și P. Lubin. „The Dipole Observed in the COBE DMR 4 Year Data”. *The Astrophysical Journal* 470 (1 octombrie 1996): 38. <https://doi.org/10.1086/177846>.
- Lisi, A. Garrett. „An Exceptionally Simple Theory of Everything”. *arXiv:0711.0770 [gr-qc, physics:hep-th]*, 6 noiembrie 2007. <http://arxiv.org/abs/0711.0770>.
- Lizarraga, Joanes, Jon Urrestilla, David Daverio, Mark Hindmarsh, Martin Kunz, și Andrew R. Liddle. „Fitting BICEP2 with defects, primordial gravitational waves and dust”. *Journal of Physics: Conference Series* 600 (28 aprilie 2015): 012025. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/600/1/012025>.
- Lodge, Oliver. „The Geometrisation of Physics, and Its Supposed Basis on the Michelson-Morley Experiment”. *News. Nature*, 1921. <https://doi.org/10.1038/106795a0>.
- Lomonosov, Mikhail Vasil’evich. *Mikhail Vasil’evich Lomonosov on the Corpuscular Theory*. First edition. edition. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 1970.
- Long, Joshua C., Hilton W. Chan, Allison B. Churnside, Eric A. Gulbis, Michael C. M. Varney, și John C. Price. „Upper Limits to Submillimetre-Range Forces from Extra Space-Time Dimensions”. *Nature* 421, nr. 6926 (februarie 2003): 922. <https://doi.org/10.1038/nature01432>.
- Lorentz, Hendrik A. „Considerations on Gravitation”. În *The Genesis of General Relativity*, ediție de Michel Janssen, John D. Norton, Jürgen Renn, Tilman Sauer, și John Stachel, 1038–52. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_13.
- Lorenz, Sean. „A Cautious Ontology of Spacetime in Quantum Gravity”. ResearchGate, 2015. https://www.researchgate.net/publication/268296604_A_CAUTIOUS_ONTOLOGY_OF_SPACETIME_IN_QUANTUM_GRAVITY.
- Lyth, David H., și Antonio Riotto. „Particle physics models of inflation and the cosmological density perturbation”. *Physics Reports* 314, nr. 1 (1 iunie 1999): 1–146. [https://doi.org/10.1016/S0370-1573\(98\)00128-8](https://doi.org/10.1016/S0370-1573(98)00128-8).
- Maddox, John. *What Remains to Be Discovered: Mapping the Secrets of the Universe, the Origins of Life, and the Future of the Human Race*. 1st Touchstone Ed edition. New York: Free Press, 1999.
- Mandl, Franz, și Graham Shaw. *Lagrangian Field Theory, in Quantum Field Theory*. John Wiley & Sons, 2013.
- Marck, J. A. „Shortcut method of solution of geodesic equations for schwarzschild black hole”. *Classical and Quantum Gravity* 13, nr. 3 (1 martie 1996): 393–402. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/3/007>.
- Marion, H., F. Pereira Dos Santos, M. Abgrall, S. Zhang, Y. Sortais, S. Bize, I. Maksimovic, et al. „A Search for Variations of Fundamental Constants using

- Atomic Fountain Clocks". *Physical Review Letters* 90, nr. 15 (18 aprilie 2003): 150801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.150801>.
- Mathur, Samir D. „The Information Paradox: Conflicts and Resolutions”. *Pramana* 79, nr. 5 (1 noiembrie 2012): 1059–73. <https://doi.org/10.1007/s12043-012-0417-z>.
- Matsubara, Keizo. „Realism, Underdetermination and String Theory Dualities”. *Synthese* 190, nr. 3 (2013): 471–489.
- . *Stringed Along Or Caught in a Loop?: Philosophical Reflections on Modern Quantum Gravity Research*. Filosofiska Institutionen, Uppsala universitet, 2012.
- Matthews, Thomas A., și Allan R. Sandage. „Optical Identification of 3C 48, 3C 196, and 3C 286 with Stellar Objects.” *The Astrophysical Journal* 138 (1 iulie 1963): 30. <https://doi.org/10.1086/147615>.
- Mattingly, James. „Is Quantum Gravity Necessary?” În *The Universe of General Relativity*, ediție de A. J. Kox și Jean Eisenstaedt, 327–38. Einstein Studies. Birkhäuser Boston, 2005.
- Maudlin, Tim. „On the Unification of Physics”. *Journal of Philosophy* 93, nr. 3 (1996): 129–144.
- Maxwell, Nicholas. *Karl Popper, Science and Enlightenment*. London: UCL Press, 2017.
- . „The Need for a Revolution in the Philosophy of Science”. *Journal for General Philosophy of Science* 33, nr. 2 (1 decembrie 2002): 381–408. <https://doi.org/10.1023/A:1022480009733>.
- McGaugh, Stacy S. „A tale of two paradigms: the mutual incommensurability of Λ CDM and MOND”. *Canadian Journal of Physics* 93, nr. 2 (21 aprilie 2014): 250–59. <https://doi.org/10.1139/cjp-2014-0203>.
- Melchiorri, A., P. A. R. Ade, P. de Bernardis, J. J. Bock, J. Borrill, A. Boscaleri, B. P. Crill, et al. „A measurement of Omega from the North American test flight of BOOMERANG”. *The Astrophysical Journal* 536, nr. 2 (20 iunie 2000): L63–66. <https://doi.org/10.1086/312744>.
- Meli, Domenico. „The Relativization of Centrifugal Force”. *Isis: A Journal of the History of Science* 81 (1990): 23–43.
- Merali, Zeeya. „Astrophysics: Fire in the Hole!” *Nature News* 496, nr. 7443 (4 aprilie 2013): 20. <https://doi.org/10.1038/496020a>.
- . „LIGO Black Hole Echoes Hint at General-Relativity Breakdown”. *Nature News*, 2016. <https://doi.org/10.1038/nature.2016.21135>.
- Merritt, David. „Gravity: The Popper Problem”. IAI TV - Changing how the world thinks, 2 octombrie 2017. <https://iai.tv/articles/gravity-the-popper-problem-auid-899>.
- Mignard, François, și F. Arenou. „Determination of the ppn parameter with the hipparcos data”, 1997.
- Milgrom, M. „A Modification of the Newtonian Dynamics as a Possible Alternative to the Hidden Mass Hypothesis”. *The Astrophysical Journal* 270 (iulie 1983): 365. <https://doi.org/10.1086/161130>.
- Milgrom, Mordehai. „MOND laws of galactic dynamics”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 437, nr. 3 (21 ianuarie 2014): 2531–41. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2066>.
- . „Quasi-linear formulation of MOND”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 403, nr. 2 (4 februarie 2010): 886–95. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.16184.x>.

- Miller, Cole. „Stellar Structure and Evolution (Lecture notes for Astronomy 606)”, 2002. <http://www.astro.umd.edu/~miller/teaching/astr606/>.
- Milne, E. A. *Kinematic relativity*. Facsimile Publisher, 2015.
- Misner, Charles W., Kip S. Thorne, și John Archibald Wheeler. *Gravitation*. W. H. Freeman, 1973.
- Moore, Gregory. „What Is... a Brane?” *Notices of the American Mathematical Society* 52, nr. 2 (28 noiembrie 2005): 214–15. <https://www.researchwithrutgers.com/en/publications/what-is-a-brane>.
- Muñoz, José A., Evencio Mediavilla, Christopher S. Kochanek, Emilio Falco, și Ana María Mosquera. „A Study of Gravitational Lens Chromaticity with the Hubble Space Telescope”. *The Astrophysical Journal* 742, nr. 2 (1 decembrie 2011): 67. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/742/2/67>.
- Nambu, Y. „Directions of Particle Physics”. *Progress of Theoretical Physics Supplement* 85 (1985): 104–10. <https://doi.org/10.1143/PTPS.85.104>.
- Narayan, Ramesh, și Matthias Bartelmann. „Lectures on Gravitational Lensing”. *arXiv:astro-ph/9606001*, 3 iunie 1996. <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9606001>.
- Narayan, Ramesh, și Jeffrey E. McClintock. „Advection-dominated accretion and the black hole event horizon”. *New Astronomy Reviews*, Jean-Pierre Lasota, X-ray Binaries, Accretion Disks and Compact Stars, 51, nr. 10 (1 mai 2008): 733–51. <https://doi.org/10.1016/j.newar.2008.03.002>.
- Narlikar, Jayant Vishnu. *Introduction to Cosmology*. Jones and Bartlett, 1983.
- NASA. „Black Holes | Science Mission Directorate”, 2019. <https://science.nasa.gov/astrophysics/focus-areas/black-holes>.
- Natorp, Paul. *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*. Sändig Reprint, H. R. Wohlwend, 1910.
- Newton, Isaac. *An Account of the Book Entitled Commercium Epistolicum Collinii & Aliorum, de Analysi Promota*, 1715.
- . *Opticks : Or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*. London : Printed for William Innys at the West-End of St. Paul’s, 1730. <http://archive.org/details/opticksortreatis1730newt>.
- . „Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, I Ed.” The British Library, 1687. <https://www.bl.uk/collection-items/newtons-principia-mathematica>.
- . *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, II Ed.*, 1713. <https://www.e-rara.ch/zut/338618>.
- . „Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, III Ed.” *Science* 177, nr. 4046 (1726): 340–42. <https://doi.org/10.1126/science.177.4046.340>.
- Ng, Y. Jack, și H. van Dam. „Measuring the foaminess of space-time with gravity-wave interferometers”. *Foundations of Physics* 30, nr. 5 (2000): 795–805. <https://doi.org/10.1023/A:1003745212871>.
- Ni, W.-T. „Equivalence principles and electromagnetism”. *Physical Review Letters* 38 (1 februarie 1977): 301–4. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.38.301>.
- Nicolai, Hermann, Kasper Peeters, și Marija Zamaklar. „Loop quantum gravity: an outside view”. *Classical and Quantum Gravity* 22, nr. 19 (7 octombrie 2005): R193–247. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/22/19/R01>.
- Nordtvedt, K. „Gravitomagnetic interaction and laser ranging to Earth satellites”. *Physical Review Letters* 61, nr. 23 (5 decembrie 1988): 2647–49. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.61.2647>.
- Nordtvedt, Kenneth. „Equivalence Principle for Massive Bodies. I. Phenomenology”. ResearchGate, 1968.

- https://www.researchgate.net/publication/243706608_Equivalence_Principle_for_Massive_Bodies_I_Phenomenology.
- . „Equivalence Principle for Massive Bodies. II. Theory”. *Physical Review* 169, nr. 5 (25 mai 1968): 1017–25. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.169.1017>.
- . „Lunar Laser Ranging - a comprehensive probe of post-Newtonian gravity”. *arXiv:gr-qc/0301024*, 7 ianuarie 2003. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0301024>.
- . „The Relativistic Orbit Observables in Lunar Laser Ranging”. ResearchGate, 1995. https://www.researchgate.net/publication/223758280_The_Relativistic_Orbit_Observables_in_Lunar_Laser_Ranging.
- Nordtvedt, Kenneth, Jr., și Clifford M. Will. „Conservation Laws and Preferred Frames in Relativistic Gravity. II. Experimental Evidence to Rule Out Preferred-Frame Theories of Gravity”. *The Astrophysical Journal* 177 (1 noiembrie 1972): 775. <https://doi.org/10.1086/151755>.
- Norton, John. *How Einstein Found His Field Equations: 1912-1915*, 1984.
- Norton, John D. „General Covariance and the Foundations of General Relativity: Eight Decades of Dispute”. *Reports of Progress in Physics* 56 (1993): 791–861.
- Nugayev, R. M. „The History of Quantum Mechanics as a Decisive Argument Favoring Einstein Over Lorentz”. *Philosophy of Science* 52, nr. 1 (1985): 44–63.
- Ohanian, Hans C., și Remo Ruffini. *Gravitation and Spacetime*. Norton, 1994.
- Ohta, T., și R. B. Mann. „Canonical reduction of two-dimensional gravity for Particle Dynamics”. *Classical and Quantum Gravity* 13, nr. 9 (1 septembrie 1996): 2585–2602. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/13/9/022>.
- Oldershaw, Robert L. „The new physics—Physical or mathematical science?” *American Journal of Physics* 56, nr. 12 (1 decembrie 1988): 1075–81. <https://doi.org/10.1119/1.15749>.
- Ouellette, Jennifer. „Black Hole Firewalls Confound Theoretical Physicists”. *Scientific American*, 2012. <https://www.scientificamerican.com/article/black-hole-firewalls-confound-theoretical-physicists/>.
- Overbye, Dennis. „Cosmos Controversy: The Universe Is Expanding, but How Fast?” *The New York Times*, 20 februarie 2017, sec. Science. <https://www.nytimes.com/2017/02/20/science/hubble-constant-universe-expanding-speed.html>.
- Overduin, James, Francis Everitt, John Mester, și Paul Worden. „The Science Case for STEP”. *Advances in Space Research* 43, nr. 10 (15 mai 2009): 1532–37. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2009.02.012>.
- Pais, Abraham. *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005.
- Partridge, R. B. *3K: The Cosmic Microwave Background Radiation*. Cambridge University Press, 2007.
- Pearle, null. „Combining Stochastic Dynamical State-Vector Reduction with Spontaneous Localization”. *Physical Review. A, General Physics* 39, nr. 5 (1 martie 1989): 2277–89.
- Peat, F. David. *Superstrings and the Search for the Theory of Everything*. 1 edition. Place of publication not identified: McGraw-Hill Education, 1989.
- Peebles, P. J. E., și Bharat Ratra. „The cosmological constant and dark energy”. *Reviews of Modern Physics* 75, nr. 2 (22 aprilie 2003): 559–606. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.75.559>.
- Peik, E., B. Lipphardt, H. Schnatz, T. Schneider, Chr Tamm, și S. G. Karshenboim. „New limit on the present temporal variation of the fine structure constant”.

- Physical Review Letters* 93, nr. 17 (18 octombrie 2004): 170801.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.170801>.
- Penrose, R. „Singularities and time-asymmetry.”, 581–638, 1979.
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1979grec.conf..581P>.
- Penrose, Roger. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. Reprint edition. New York: Vintage, 2007.
- Petit, J. P., și G. D'Agostini. „Cosmological bimetric model with interacting positive and negative masses and two different speeds of light, in agreement with the observed acceleration of the Universe”. *Modern Physics Letters A* 29, nr. 34 (27 octombrie 2014): 1450182. <https://doi.org/10.1142/S021773231450182X>.
- Petzoldt, Joseph, Giora Hon, și Ernst Mach. *Der Verhältnis der Machschen Gedankenwelt zur Relativitätstheorie, an appendix to Die Mechanik in ihrer Entwicklung: Historisch-kritisch dargestellt*. Xenomoi Verlag, 1921.
- Pickering, Andrew. „The Hunting of the Quark”. *Isis* 72, nr. 2 (1981): 216–236.
 ———. *The Mangle of Practice: Time, Agency, and Science*. 1 edition. Chicago: University of Chicago Press, 1995.
- Pierris, Graciela de. „Hume and Locke on Scientific Methodology: The Newtonian Legacy”. *Hume Studies* 32, nr. 2 (2006): 277–329.
- Pinna, S., și Simone Pinna. „A Conceptual Test for Cognitively Coherent Quantum Gravity Models”, 2017. <https://doi.org/10.3390/technologies5030051>.
- Poincaré, Henri. „Les Relations Entre La Physique Expérimentale et La Physique Mathématique, in Revue Générale Des Sciences Pures et Appliquées”. Issue. Gallica, 1900. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k17075r>.
- Poincare, Henri. *Science and Hypothesis*. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.
 ———. *The Foundations of Science; Science and Hypothesis, the Value of Science, Science and Method*. Place of publication not identified: TheClassics.us, 2013.
- Polchinski, Joseph. „Dualities of Fields and Strings”. *arXiv:1412.5704 [hep-th]*, 17 decembrie 2014. <http://arxiv.org/abs/1412.5704>.
- Pollio, Vitruvius. *De architectura*. Torino: Giulio Einaudi, 1997.
- Popper, Karl. *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. 2nd edition. London ; New York: Routledge, 2002.
- Popper, Karl Raimund. *The Logic of Scientific Discovery*. Psychology Press, 2002.
- Pound, R. V., și G. A. Rebka. „Apparent Weight of Photons”. *Physical Review Letters* 4, nr. 7 (1 aprilie 1960): 337–41. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.337>.
- Prugovecki, Eduard. „Historical and Epistemological Perspectives on Developments in Relativity and Quantum Theory”. ResearchGate, 1992.
https://www.researchgate.net/publication/300434048_Historical_and_Epistemological_Perspectives_on_Developments_in_Relativity_and_Quantum_Theory.
- Quine, W. V. „On the Reasons for Indeterminacy of Translation”. *The Journal of Philosophy*, 1 ianuarie 1970. <https://doi.org/10.2307/2023887>.
 ———. *Ontological Relativity & Other Essays*. New York: Columbia University Press, 1969.
- Quine, Willard V. „On Empirically Equivalent Systems of the World”. *Erkenntnis* 9, nr. 3 (1975): 313–28.
- Randall, Lisa, și Raman Sundrum. „A Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension”. *Physical Review Letters* 83, nr. 17 (25 octombrie 1999): 3370–73. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.3370>.
 ———. „An Alternative to Compactification”. *Physical Review Letters* 83, nr. 23 (6 decembrie 1999): 4690–93. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.4690>.

- Reichenbach, Hans. *Philosophie der Raum-Zeit-Lehre*. 1 Plate. De Gruyter, 1928.
- . *Relativitätstheorie Und Erkenntnis Apriori*. J. Springer, 1920.
- . *The Philosophy of Space and Time*. 1st edition. New York, NY: Dover Publications, 1957.
- Rendall, Alan D. „The nature of spacetime singularities”. *arXiv:gr-qc/0503112*, noiembrie 2005, 76–92. https://doi.org/10.1142/9789812700988_0003.
- Reyes, Reinabelle, Rachel Mandelbaum, Uros Seljak, Tobias Baldauf, James E. Gunn, Lucas Lombriser, și Robert E. Smith. „Confirmation of general relativity on large scales from weak lensing and galaxy velocities”. *Nature* 464, nr. 7286 (martie 2010): 256–58. <https://doi.org/10.1038/nature08857>.
- Rham, Claudia de, Gregory Gabadadze, și Andrew J. Tolley. „Resummation of Massive Gravity”. *Physical Review Letters* 106, nr. 23 (10 iunie 2011): 231101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.231101>.
- Rickles, Dean. „A philosopher looks at string dualities”. *Studies in the History and Philosophy of Modern Physics* 42 (2011): 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.12.005>.
- . „Quantum Gravity: A Primer for Philosophers.” Preprint, octombrie 2008. <http://philsci-archive.pitt.edu/5387/>.
- Riemann, B. *Neue mathematische Prinzipien der Naturphilosophie*. Leipzig: Dedekind, R.; Weber, W., 1876.
- Riemann, Bernhard, și Hermann Weyl. *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1919. <https://www.springer.com/gp/book/9783662423165>.
- Ries, John C, Richard J Eanes, Byron D Tapley, și Glenn E Peterson. „Prospects for an Improved Lense-Thirring Test with SLR and the GRACE Gravity Mission”, f.a., 7.
- Ritz, Walther. „Recherches critiques sur l'électrodynamique générale”. *Annales de chimie et de physique*, 1908.
- Rogers, G. A. J. „Locke's Essay and Newton's Principia”. *Journal of the History of Ideas* 39, nr. 2 (1978): 217.
- Roll, P. G., R. Krotkov, și R. H. Dicke. „The equivalence of inertial and passive gravitational mass”. *Annals of Physics* 26 (1 februarie 1964): 442–517. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(64\)90259-3](https://doi.org/10.1016/0003-4916(64)90259-3).
- Romero, Gustavo E. „Philosophical Issues of Black Holes”. *arXiv:1409.3318 [astro-ph, physics:gr-qc, physics:physics]*, 10 septembrie 2014. <http://arxiv.org/abs/1409.3318>.
- Rosen, N. „General Relativity and Flat Space. I”. *Physical Review* 57, nr. 2 (15 ianuarie 1940): 147–50. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.57.147>.
- Rosenfeld, L. „On quantization of fields”. *Nuclear Physics* 40 (1 februarie 1963): 353–56. [https://doi.org/10.1016/0029-5582\(63\)90279-7](https://doi.org/10.1016/0029-5582(63)90279-7).
- Rovelli, Carlo. „Halfway Through the Woods: Contemporary Research on Space and Time”. În *The Cosmos of Science*, ediție de John Earman și John Norton, 180–223. University of Pittsburgh Press, 1997.
- . „Notes for a brief history of quantum gravity”. *arXiv:gr-qc/0006061*, 16 iunie 2000. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0006061>.
- . „Quantum Gravity”. Cambridge Core, noiembrie 2004. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511755804>.
- . „Relational Quantum Mechanics”. *International Journal of Theoretical Physics* 35, nr. 8 (august 1996): 1637–78. <https://doi.org/10.1007/BF02302261>.

- . „The Disappearance of Space and Time”. În *The Disappearance of Space and Time*, ediție de Dennis Dieks. Elsevier, 2007.
- Russell, Bertrand. *Relativity: Philosophical Consequences, in Encyclopaedia Britannica: Thirteenth Edition Volume 31*. ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA PRESS, 1926.
- . *The Analysis of Matter*. First Paperback Edition edition. Nottingham: Spokesman Books, 2007.
- Ryan, Fintan D. „Gravitational waves from the inspiral of a compact object into a massive, axisymmetric body with arbitrary multipole moments”. *Physical Review D* 52, nr. 10 (15 noiembrie 1995): 5707–18.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.52.5707>.
- Ryckman, Thomas. „A Believing Rationalist”. The Cambridge Companion to Einstein, mai 2014. <https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.014>.
- . *Einstein*. 1 edition. London ; New York: Routledge, 2011.
- . *The Reign of Relativity: Philosophy in Physics 1915-1925*. 1 edition. Oxford ; New York: Oxford University Press, 2005.
- Ryckman, Thomas A. „Early Philosophical Interpretations of General Relativity”. În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Spring 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018.
<https://plato.stanford.edu/archives/spr2018/entries/genrel-early/>.
- Ryden, Barbara. *Introduction to cosmology*, 2003.
<http://adsabs.harvard.edu/abs/2003itc..book....R>.
- Sachdev, Subir. „Strange and Stringy”. *Scientific American* 308 (1 decembrie 2012): 44–51. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0113-44>.
- Sadoulet, Bernard. „The Direct Detection of Dark Matter”. ResearchGate, 1998.
https://www.researchgate.net/publication/260854303_The_Direct_Detection_of_Dark_Matter.
- Salimkhani, Kian. „Quantum Gravity: A Dogma of Unification?” În *Philosophy of Science. European Studies in Philosophy of Science*, vol 9., ediție de Alexander Christian, David Hommen, Nina Retzlaff, și Gerhard Schurz, 23–41. Cham: Springer, 2018.
- Sanders, A. J., A. D. Alexeev, S. W. Allison, K. A. Bronnikov, J. W. Campbell, M. R. Cates, T. A. Corcovilos, et al. „Project SEE (Satellite Energy Exchange): Proposal for Space-Based Gravitational Measurements”. *Measurement Science and Technology* 10, nr. 6 (ianuarie 1999): 514–524.
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/6/317>.
- Sauer, Tilman. „Einstein’s Unified Field Theory Program”. The Cambridge Companion to Einstein, mai 2014.
<https://doi.org/10.1017/CCO9781139024525.011>.
- Schiff, L. I. „On Experimental Tests of the General Theory of Relativity”. *American Journal of Physics* 28, nr. 4 (1 aprilie 1960): 340–43.
<https://doi.org/10.1119/1.1935800>.
- Schiller, S. „Gravitational Physics with Optical Clocks in Space”, 2015, 31.
- Schilpp, Paul Arthur, ed. *Albert Einstein, Philosopher-Scientist: The Library of Living Philosophers Volume VII*. 3rd edition. La Salle, Ill.: Open Court, 1998.
- Schlick, Moritz. *Allgemeine Erkenntnislehre: Abteilung I / Band 1*. Ediție de Hans Jürgen Wendel și Fynn Ole Engler. Abteilung I: Veröffentlichte Schriften. Wien: Springer-Verlag, 2009.
<https://www.springer.com/gp/book/9783211327685>.
- . „Kritizistische Oder Empiristische Deutung der Neuen Physik?” *Société Française de Philosophie, Bulletin* 26, nr. n/a (1921): 96.

- . *Space and Time in Contemporary Physics: An Introduction to the Theory of Relativity and Gravitation*. Mineola, N.Y: Dover Publications, 2005.
- Schmidhuber, Jürgen. „A Computer Scientist’s View of Life, the Universe, and Everything. Lecture Notes in Computer Science”, 1997.
<http://people.idsia.ch/~juergen/everything/>.
- . „Hierarchies of generalized kolmogorov complexities and nonenumerable universal measures computable in the limit”. *International Journal of Foundations of Computer Science* 13, nr. 04 (1 august 2002): 587–612.
<https://doi.org/10.1142/S0129054102001291>.
- Schutz, Bernard. „Gravity from the Ground Up by Bernard Schutz”. Cambridge Core, decembrie 2003. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807800>.
- Schwarz, John H. „String Theory: Progress and Problems”. *Progress of Theoretical Physics Supplement* 170 (1 mai 2007): 214–26.
<https://doi.org/10.1143/PTPS.170.214>.
- Seidel, Edward. „Numerical Relativity: Towards Simulations of 3D Black Hole Coalescence”. *arXiv:gr-qc/9806088*, 23 iunie 1998. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9806088>.
- Seljak, Uros , și Matias Zaldarriaga. „Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background”. *Physical Review Letters* 78, nr. 11 (17 martie 1997): 2054–57. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.2054>.
- Sellien, Ewald. *Die erkenntnistheoretische Bedeutung der Relativitätstheorie*. Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1919.
- Sfetcu, Nicolae. *Isaac Newton despre acțiunea la distanță în gravitație - Cu sau fără Dumnezeu?* MultiMedia Publishing, 2018.
<http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24577.97122>.
- . „Reconstructia Ratională a Stiinței Prin Programe de Cercetare”, 2019.
<http://doi.org/10.13140/RG.2.2.24667.21288>.
- . *Singularitățile ca limite ontologice ale relativității generale*. MultiMedia Publishing, 2018. <http://doi.org/10.13140/RG.2.2.17470.18242>.
- Shao, Lijing, și Norbert Wex. „Tests of gravitational symmetries with radio pulsars”. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 59, nr. 9 (septembrie 2016): 699501. <https://doi.org/10.1007/s11433-016-0087-6>.
- Shapin, Steven, și Simon Schaffer. *Leviathan and the Air-Pump: Hobbes, Boyle, and the Experimental Life*. Princeton University Press, 1989.
- Shapiro, Irwin I. „Fourth Test of General Relativity”. *Physical Review Letters* 13, nr. 26 (28 decembrie 1964): 789–91.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>.
- Shapiro, Irwin I., Michael E. Ash, Richard P. Ingalls, William B. Smith, Donald B. Campbell, Rolf B. Dyce, Raymond F. Jurgens, și Gordon H. Pettengill. „Fourth Test of General Relativity: New Radar Result”. *Physical Review Letters* 26, nr. 18 (3 mai 1971): 1132–35. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.26.1132>.
- Shapiro, S. S., J. L. Davis, D. E. Lebach, și J. S. Gregory. „Measurement of the Solar Gravitational Deflection of Radio Waves using Geodetic Very-Long-Baseline Interferometry Data, 1979–1999”. *Physical Review Letters* 92, nr. 12 (26 martie 2004): 121101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.121101>.
- Silk, Joseph. „Formation of Galaxies”. *The Philosophy of Cosmology*, aprilie 2017.
<https://doi.org/10.1017/9781316535783.009>.
- Sitter, W. de. „On Einstein’s theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77 (1 decembrie 1916): 155–84. <https://doi.org/10.1093/mnras/77.2.155>.

- Smeenk, Christopher, și George Ellis. „Philosophy of Cosmology”. În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Winter 2017. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2017. <https://plato.stanford.edu/archives/win2017/entries/cosmology/>.
- Smith, George. „Newton’s Philosophiae Naturalis Principia Mathematica”. În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Winter 2008. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2008. <https://plato.stanford.edu/archives/win2008/entries/newton-principia/>.
- Smith, Quentin. *Einstein, Relativity and Absolute Simultaneity*. Ediție de William Lane Craig. 1 edition. London: Routledge, 2007.
- Smith, W. B. „Radar observations of Venus, 1961 and 1959”. *The Astronomical Journal* 68 (1 februarie 1963): 15. <https://doi.org/10.1086/108904>.
- Smolin, Lee. „A perspective on the landscape problem”. *Foundations of Physics* 43, nr. 1 (ianuarie 2013): 21–45. <https://doi.org/10.1007/s10701-012-9652-x>.
- . „The case for background independence”. *arXiv:hep-th/0507235*, 25 iulie 2005. <http://arxiv.org/abs/hep-th/0507235>.
- . *The Trouble With Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science, and What Comes Next*. Reprint edition. Boston u.a: Mariner Books, 2007.
- Song, Yong-Seon, și Olivier Doré. „A step towards testing general relativity using weak gravitational lensing and redshift surveys”. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* 2009, nr. 03 (23 martie 2009): 025–025. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2009/03/025>.
- Spergel, D. N., R. Bean, O. Doré, M. R. Nolta, C. L. Bennett, J. Dunkley, G. Hinshaw, et al. „Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology”. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 170, nr. 2 (iunie 2007): 377–408. <https://doi.org/10.1086/513700>.
- Spergel, D. N., L. Verde, H. V. Peiris, E. Komatsu, M. R. Nolta, C. L. Bennett, M. Halpern, et al. „First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters”. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 148, nr. 1 (septembrie 2003): 175–194. <https://doi.org/10.1086/377226>.
- Springel, Volker, Simon D. M. White, Adrian Jenkins, Carlos S. Frenk, Naoki Yoshida, Liang Gao, Julio Navarro, et al. „Simulations of the Formation, Evolution and Clustering of Galaxies and Quasars”. *Nature* 435, nr. 7042 (iunie 2005): 629. <https://doi.org/10.1038/nature03597>.
- Stanley, Matthew. „“An Expedition to Heal the Wounds of War” The 1919 Eclipse and Eddington as Quaker Adventurer”. *Isis* 94, nr. 1 (1 martie 2003): 57–89. <https://doi.org/10.1086/376099>.
- Stanwix, Paul L., Michael E. Tobar, Peter Wolf, Mohamad Susli, Clayton R. Locke, Eugene N. Ivanov, John Winterflood, și Frank van Kann. „Test of Lorentz Invariance in Electrodynamics Using Rotating Cryogenic Sapphire Microwave Oscillators”. *Physical Review Letters* 95, nr. 4 (21 iulie 2005): 040404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.040404>.
- Stokes, George Gabriel. *On Fresnel’s Theory of the Aberration of Light*. London, 1846.
- Strominger, Andrew. „Black Hole Entropy from Near-Horizon Microstates”. *Journal of High Energy Physics* 1998, nr. 02 (15 februarie 1998): 009–009. <https://doi.org/10.1088/1126-6708/1998/02/009>.
- Strominger, Andrew, și Cumrun Vafa. „Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy”. *Physics Letters B* 379, nr. 1 (27 iunie 1996): 99–104. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(96\)00345-0](https://doi.org/10.1016/0370-2693(96)00345-0).

- Susskind, Leonard. „Lecture Collection | Topics in String Theory (Winter 2011)”. YouTube, 2011.
<http://www.youtube.com/playlist?list=PL3E633552E58EB230>.
- . *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics*. Reprint edition. New York: Back Bay Books, 2009.
- Szegedi, Péter. „Lakatos On Crucial Experiments And The History Of Interpretations Of Quantum Mechanics”. În *Appraising Lakatos: Mathematics, Methodology and the Man*, ediție de G. Kampis, L. : Kvasz, și M. Stöltzner, 1–101. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Tegmark, Max, și John Archibald Wheeler. „100 Years of the Quantum”. *arXiv:quant-ph/0101077*, 17 ianuarie 2001. <http://arxiv.org/abs/quant-ph/0101077>.
- Thiemann, Thomas. *Modern Canonical Quantum General Relativity*. 1 edition. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2008.
- . „The Phoenix Project: Master Constraint Programme for Loop Quantum Gravity”. *Classical and Quantum Gravity* 23, nr. 7 (7 aprilie 2006): 2211–47. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/23/7/002>.
- Thorne, Kip S. „Gravitational Waves”. *arXiv:gr-qc/9506086*, 30 iunie 1995. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9506086>.
- Thorne, Kip S., Richard H. Price, și Douglas A. MacDonald. *Black holes: The membrane paradigm*, 1986.
<http://adsabs.harvard.edu/abs/1986bhmp.book.....T>.
- Tipler, Paul A., și Ralph Llewellyn. *Modern Physics*. Sixth edition. New York: W. H. Freeman, 2012.
- Tong, David. *String Theory*. University of Cambridge, 2009.
<http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/string/string.pdf>.
- Townsend, P. K. „Four Lectures on M-theory”. *arXiv:hep-th/9612121*, 11 decembrie 1996. <http://arxiv.org/abs/hep-th/9612121>.
- Trenkel, Christian, Steve Kemble, Neil Bevis, și Joao Magueijo. „Testing MOND/TEVES with LISA Pathfinder”. *arXiv:1001.1303 [astro-ph]*, 8 ianuarie 2010. <http://arxiv.org/abs/1001.1303>.
- Van Patten, R. A., și C. W. F. Everitt. „Possible Experiment with Two Counter-Orbiting Drag-Free Satellites to Obtain a New Test of Einstein’s General Theory of Relativity and Improved Measurements in Geodesy”. *Physical Review Letters* 36, nr. 12 (22 martie 1976): 629–32.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.36.629>.
- Varignon, Pierre (1654-1722) Auteur du texte. *Nouvelles Conjectures Sur La Pesanteur*, Par M. Varignon,..., 1690.
<https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k74179x>.
- Verhagen, Paul. „Understanding the Theory of Everything: Evaluating Criticism Aimed at String Theory”. Amsterdam University College, 2015.
<http://www.uva.nl/binaries/content/documents/personalpages/h/a/s.deharo/en/tab-three/tab-three/cpitem%5B8%5D/asset>.
- Vessot, R. F. C., M. W. Levine, E. M. Mattison, E. L. Blomberg, T. E. Hoffman, G. U. Nystrom, B. F. Farrel, et al. „Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser”. *Physical Review Letters* 45, nr. 26 (29 decembrie 1980): 2081–84. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.45.2081>.
- Visser, Matt. „Acoustic black holes”. *arXiv:gr-qc/9901047*, 15 ianuarie 1999. <http://arxiv.org/abs/gr-qc/9901047>.
- Vistarini, Tiziana. „Emergent Spacetime in String Theory”, 2013, 103.

- Volovik, G. E. „Field theory in superfluid ^3He : What are the lessons for particle physics, gravity and high-temperature superconductivity?” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 96, nr. 11 (25 mai 1999): 6042–47. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.11.6042>.
- Von Neumann, John. *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Berlin: J. Springer, 1932.
- Wald, Robert M. „The Thermodynamics of Black Holes”. *Living Reviews in Relativity* 4, nr. 1 (9 iulie 2001): 6. <https://doi.org/10.12942/lrr-2001-6>.
- Wallin, John F., David S. Dixon, și Gary L. Page. „Testing Gravity in the Outer Solar System: Results from Trans-Neptunian Objects”. *The Astrophysical Journal* 666, nr. 2 (10 septembrie 2007): 1296–1302. <https://doi.org/10.1086/520528>.
- Walsh, D., R. F. Carswell, și R. J. Weymann. „0957 + 561 A, B: Twin Quasistellar Objects or Gravitational Lens?” *Nature* 279, nr. 5712 (mai 1979): 381. <https://doi.org/10.1038/279381a0>.
- Walter, Scott. „Breaking in the 4-Vectors: The Four-Dimensional Movement in Gravitation, 1905–1910”. În *The Genesis of General Relativity*, ediție de Michel Janssen, John D. Norton, Jürgen Renn, Tilman Sauer, și John Stachel, 1118–78. Boston Studies in the Philosophy of Science. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4000-9_18.
- Wambsganss, Joachim. „Gravitational Lensing in Astronomy”. *Living Reviews in Relativity* 1, nr. 1 (2 noiembrie 1998): 12. <https://doi.org/10.12942/lrr-1998-12>.
- Weinberg, Steven. *Dreams Of A Final Theory: The Search for The Fundamental Laws of Nature*. Random House, 2010.
- . „The cosmological constant problem”. *Reviews of Modern Physics* 61, nr. 1 (1 ianuarie 1989): 1–23. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.61.1>.
- . *The Quantum Theory of Fields, Volume 2: Modern Applications*. 1 edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- . *The Quantum Theory of Fields, Volume 3: Supersymmetry*. 1st Edition edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- . „What is Quantum Field Theory, and What Did We Think It Is?” *arXiv:hep-th/9702027*, 3 februarie 1997. <http://arxiv.org/abs/hep-th/9702027>.
- Weingard, Robert. „A Philosopher Looks at String Theory”. *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 1988 (1988): 95–106.
- Weinstein, Steven. „Absolute Quantum Mechanics”. Preprint, 2000. <http://philsci-archive.pitt.edu/836/>.
- Weinstein, Steven, și Dean Rickles. „Quantum Gravity”. În *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, ediție de Edward N. Zalta, Winter 2018. Metaphysics Research Lab, Stanford University, 2018. <https://plato.stanford.edu/archives/win2018/entries/quantum-gravity/>.
- Weisberg, Joel M., David J. Nice, și Joseph H. Taylor. „Timing Measurements of the Relativistic Binary Pulsar PSR B1913+16”. *The Astrophysical Journal* 722, nr. 2 (20 octombrie 2010): 1030–34. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/722/2/1030>.
- Weyl, Hermann, Axel Hildebrand, și Dieter Schmalstieg. *Raum. Zeit. Materie: Vorlesungen über allgemeine Relativitätstheorie*. 7. Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo: Springer, 1988.
- Weyl, Hermann, și Frank Wilczek. *Philosophy of Mathematics and Natural Science*. Revised ed. edition. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 2009.

- Wheeler, John A. „On the nature of quantum geometrodynamics”. *Annals of Physics* 2, nr. 6 (1 decembrie 1957): 604–14. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(57\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0003-4916(57)90050-7).
- Whitehead, Alfred North. *The Principle Of Relativity With Applications To Physical Science*. Whitefish, Mont.: Kessinger Publishing, LLC, 2008.
- Whitrow, G. J., și G. E. Morduch. „Relativistic theories of gravitation : A comparative analysis with particular reference to astronomical tests”. *Vistas in Astronomy* 6 (1965): 1–67. [https://doi.org/10.1016/0083-6656\(65\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0083-6656(65)90002-4).
- Whittaker, Edmund Taylor. *A History of the Theories of Aether and Electricity*. Harper, 1960.
- Wigner, E. P., I. J. Good, A. J. Mayne, J. M. Smith, și Thornton Page. „The Scientist Speculates: An Anthology of Partly-baked Ideas”. *American Journal of Physics* 32, nr. 4 (1 aprilie 1964): 322–322. <https://doi.org/10.1119/1.1970298>.
- Will, C. M. „The theoretical tools of experimental gravitation”, 1, 1974. <http://adsabs.harvard.edu/abs/1974exgr.conf....1W>.
- . „Theoretical Frameworks For Testing Relativistic Gravity. Ii. Parametrized Post-Newtonian Hydrodynamics, And The Nordtvedt Effect.” *Astrophys. J.* 163: 611-28(1 Feb 1971)., 1 ianuarie 1971. <https://doi.org/10.1086/150804>.
- . „Twilight time for the fifth force?”, 1990. <http://connection.ebscohost.com/c/articles/9011192203/twilight-time-fifth-force>.
- Will, Clifford. *The Renaissance of General Relativity, in The New Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- Will, Clifford M. „Is momentum conserved? A test in the binary system PSR 1913 + 16”. *The Astrophysical Journal Letters* 393 (1 iulie 1992): L59–61. <https://doi.org/10.1086/186451>.
- . „The Confrontation between General Relativity and Experiment”. *Living Reviews in Relativity* 17, nr. 1 (decembrie 2014): 4. <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>.
- . *Theory and Experiment in Gravitational Physics, Revised Edition*. Revised edition. Cambridge England ; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1993.
- . *Was Einstein Right?: Putting General Relativity To The Test*. 2 edition. New York, NY: Basic Books, 1993.
- Williams, James G., Slava G. Turyshev, și Dale H. Boggs. „Progress in Lunar Laser Ranging Tests of Relativistic Gravity”. *Physical Review Letters* 93, nr. 26 (29 decembrie 2004): 261101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.261101>.
- Winsberg, Eric. *Science in the Age of Computer Simulation*. Chicago: University of Chicago Press, 2010.
- Woit, Peter. *Not Even Wrong: The Failure of String Theory and the Search for Unity in Physical Law*. Reprint edition. Basic Books, 2007.
- Wright, E. L. „What is the evidence for the Big Bang?, in Frequently Asked Questions in Cosmology”, 2009. http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmology_faq.html#BBevidence.
- Wuthrich, Christian. „In Search of Lost Spacetime: Philosophical Issues Arising in Quantum Gravity”, 2011.
- . „To quantize or not to quantize: Fact and folklore in quantum gravity”. Published Article or Volume. *Philosophy of Science*, 2005. <http://www.jstor.org/stable/10.1086/508946>.
- Yau, Shing-Tung. *The Shape of Inner Space*. Reprint edition. Basic Books, 2012.

- Yilmaz, Hüseyin. „New approach to relativity and gravitation”. *Annals of Physics* 81, nr. 1 (1 noiembrie 1973): 179–200. [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(73\)90485-5](https://doi.org/10.1016/0003-4916(73)90485-5).
- Zahar, Elie. „Why Did Einstein’s Programme Supersede Lorentz’s? (II)”. *British Journal for the Philosophy of Science* 24, nr. 3 (1973): 223–262.
- Zandvoort, H., Paul Weingartner, și Methodology and Philosophy of Science International Congress of Logic. *Intrinsic Success and Extrinsic Success of Research Programs, in 7th International Congress of Logic, Methodology and Philosophy of Science: Salzburg, July 11th-16th, 1983 Vol. 4, Vol. 4.* Salzburg: Huttegger, 1983.
- Zee, A. *Quantum Field Theory in a Nutshell, 2nd Edition*. 2 edition. Princeton, N.J: Princeton University Press, 2010.
- Zenneck, J. „Gravitation”. În *Encyklopädie der Mathematischen Wissenschaften mit Einschluss ihrer Anwendungen: Fünfter Band in Drei Teilen Physik*, ediție de A. Sommerfeld, 25–67. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1903. https://doi.org/10.1007/978-3-663-16016-8_2.
- Zinkernagel, Henrik. „The Philosophy Behind Quantum Gravity”. *Theoria : An International Journal for Theory, History and Foundations of Science* 21, nr. 3 (2010): 295–312.
- Zwiebach, Barton. *A First Course in String Theory*. 2 edition. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2009.
- Zyga, Lisa. „Gravitational Waves May Oscillate, Just like Neutrinos”, 2017. <https://phys.org/news/2017-09-gravitational-oscillate-neutrinos.html>.